

28568

28508

INTRODUCTION A LA
MÉCANIQUE DE LA VIE

I
ÉLECTRODYNAMIQUE DU MUSCLE

PAR

CHARLES LAVILLE, Ingénieur-Conseil (E. S. E.)



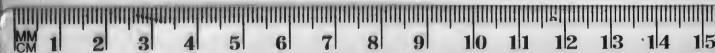
ÉDITIONS LAVILLE S. A.

29 bis, RUE DEMOURS, PARIS (XVII^e)

1928



INTRODUCTION A LA
MÉCANIQUE DE LA VIE
I
ÉLECTRODYNAMIQUE DU MUSCLE



L'Introduction à la Mécanique de la Vie

comprendra les sept volumes suivants, dont deux sont actuellement parus et dont les autres paraîtront au cours de 1928-1929 :

- I. — *Électrodynamique du muscle.*
- II. — *Électrostatique du nerf.*
- III. — *Le couple hydro-électrique vital.*
- IV. — *Sensations, Mémoire. Conscience.*
- V. — *Dynamique de la cellule.*
- VI. — *Le Cancer, dérangement électrique.*
- VII. — *Philosophie réaliste.*

INTRODUCTION A LA
MÉCANIQUE DE LA VIE

I
ÉLECTRODYNAMIQUE DU MUSCLE

PAR

CHARLES LAVILLE, Ingénieur-Conseil (E. S. E.)



28568

ÉDITIONS LAVILLE S. A.

29 bis, RUE DEMOURS, PARIS (XVII^e)

1928

INTRODUCTION

Pour faire exister cette force vitale qui agit dans les corps animés et lui donner les propriétés qu'on lui connaît la nature n'a pas besoin de lois particulières; celles qui régissent généralement tous les corps lui suffisent pour cet objet.

LAMARCK.

Les théories qui sont exposées dans l'ouvrage dont nous soumettons aujourd'hui la première partie au public, ne sont peut-être pas toutes entièrement nouvelles. Sans remonter jusqu'à la science indienne ou aux philosophes de la Grèce antique, un esprit chercheur en pourrait, beaucoup plus près de nous, trouver les premiers éléments épars dans les œuvres de « sympathistes », comme TIPHAYGNE DE LA ROCHE, dans celles de visionnaires, de logiciens ou de physiciens, comme LA METTRIE, CONDILLAC ou PRIESTLEY, voire même dans les travaux couverts d'obscurité des adeptes de la doctrine ésotérique.

L'auteur ne peut donc réclamer, en faveur des théories dont il donne ici le développement, que le seul avantage d'une plus grande précision dans les termes et d'une volonté mieux affirmée de ramener l'explication de certains phénomènes biologiques dans le cadre que nous sommes habitués à donner aux phénomènes de l'ordre purement physique.

On croit assez ordinairement que l'assimilation de l'action nerveuse à une action électrique a pris naissance vers le milieu du dix-huitième siècle, comme

conséquence à la découverte de la bouteille de Leyde. Les hasards de la bibliophilie m'ont fait connaître que, dès 1738, William CROONE avait communiqué à la Société Royale de Londres un travail fort ingénieux sur la contraction musculaire, en suite d'expériences qu'il avait faites sur des grenouilles décapitées. Ces expériences présentaient une curieuse analogie avec celles qui, répétées un demi-siècle plus tard par GALVANI, et certainement ignorées par lui, assurèrent au savant italien une gloire impérissable.

La théorie électro-vitaliste, qui aurait dû suivre pas à pas les rapides progrès de la science électrique, connut l'abandon vers le premier tiers du dix-neuvième siècle. Alors, un arbre s'éleva, qui masqua la forêt... Et cet arbre fut dressé par DU BOIS-REYMOND. Rendons à l'illustre physiologiste cette justice qu'il ne fut, en l'occurrence, point le coupable : sa théorie des courants musculaires était basée sur des faits incontestables. Mais pourquoi certains de ses successeurs, plaçant l'effet par devant la cause et négligeant les phénomènes primordiaux au profit des phénomènes résiduels, ont-ils eu l'aveuglement de confondre les constatations de DU BOIS-REYMOND avec une explication du fonctionnement de l'appareil musculaire ? Une telle erreur de jugement est impardonnable, car elle a reculé de cinquante ans l'apparition d'une hypothèse satisfaisante venant éclairer le fait de la motilité. Et ceux qui ne sont point familiarisés avec toutes les possibilités, bonnes ou mauvaises, de l'esprit humain demeureront stupéfaits de voir comment, à de certains moments, les intelligences supérieures peuvent s'égarer hors des voies qu'elles devraient suivre. Le bon sens le plus élémentaire n'indiquait-il pas qu'un mécanisme n'a pu tirer l'énergie qui l'a fait fonctionner, de l'électricité qu'il peut restituer ? Et n'indiquait-il pas aussi que, susceptible de faire apparaître des courants électriques dans ses

périodes de repos, le muscle devait probablement en utiliser pendant son travail ?

Retracer l'histoire des variations de la théorie musculaire depuis trois quarts de siècle reviendrait simplement à passer en revue les grands progrès de la science physique dans le même temps, depuis l'avènement de la thermodynamique jusqu'à celui de la théorie des quanta, en passant par celle des ions et des électrons... Une seule hypothèse a été proche des réalités : celle des actions électro-capillaires de D'ARSONVAL. Il ne semble pas qu'elle ait concentré autour de son exposé les recherches qu'elle aurait dû provoquer ; méthodiquement poursuivies, ces recherches auraient automatiquement démontré l'importance primordiale que prennent les capacités et les charges dans les manifestations de l'électricité vitale.

Mais les investigations se sont poursuivies vers une tout autre direction. Par un travers tout naturel à l'intellect humain et qui fait de nous des gens toujours trop pressés de connaître la fin de toutes choses, les savants se sont jetés tour à tour, avec une insatiable avidité, sur tout ce que les sciences physiques leur apportaient de nouveau ; et ceci dans l'espoir, chaque fois déçu, que ce nouveau apportait avec lui la clé d'une infinité de mystères touchant les choses de la vie.

A chaque jour suffit sa peine, dit la sagesse populaire. Vouloir attaquer d'emblée tout le problème biologique, si varié dans sa complexité, c'est courir vers un échec mathématiquement certain. Mais il n'est pas de difficulté, si grande soit-elle, qui ne puisse être subdivisée en un grand nombre d'autres menues difficultés, susceptibles d'être abordées avec les plus grandes chances de résolution.

La grande force de l'auteur s'est justement trouvée dans ce fait que, parfaitement ignorant, à l'origine de ses travaux, de tous les efforts accomplis depuis deux

siècles pour arriver à une explication plausible des manifestations de l'énergie vitale, il ne s'est attaqué qu'à trouver la réponse au plus mince d'entre tous les problèmes que pose la physiologie : « Quelle énergie oblige le muscle à se contracter ? »

En 1906, mon Maître, le professeur Raoul BARON, qui fut pour moi un second père, me détermina à jeter un regard « frais » sur certains travaux de dynamique musculaire que, pour s'être lui-même fortement attaché à la question, il trouvait insuffisants dans leurs méthodes d'investigations et contestables dans leurs résultats. Quoique zootechnicien éminent, R. BARON avait conservé de ses études premières un goût très prononcé pour la mathématique et la mécanique ; il n'avait jamais cessé de suivre cet entraînement si puissant que constitue, pour la faculté du raisonnement, la pratique de l'arithmétique supérieure. Le point de vue biologiste, à cette époque, ne cadrait pas d'assez près avec celui des sciences exactes pour qu'il pût s'en montrer satisfait.

Avant de discuter les théories admises, ou en voie d'établissement, concernant l'énergétique animale, il me sembla qu'il était essentiel de commencer par reconnaître quelle sorte de machine était, au juste, l'appareil musculaire. Avec la tranquille audace de l'inexpérience et cette foi solide, inculquée par mon Maître, dans la puissance d'une argumentation bien conduite, je me mis à la besogne. Ma formation professionnelle me conduisit tout naturellement à ne voir dans le muscle autre chose qu'un dispositif électrique et, mon orientation ainsi prise, mes recherches se poursuivirent méthodiquement, autant qu'avec passion. Frappé, dès l'abord, par ce fait que le courant continu ne pouvait alimenter convenablement le muscle, alors que les courants variables le mettaient en action, je ne

tardai pas, à la suite de quelques tâtonnements et d'élimination en élimination, à me faire cette idée que le muscle ne pouvait être qu'un condensateur à faible résistance d'isolement, variable avec le temps.

Je jetai quelques calculs sur le papier, puis les rédigeai sous forme d'une note que j'adressai à une publication dans laquelle paraissaient de nombreux articles consacrés à la physiologie... Et ainsi appris-je que, contrairement à la formule sacramentelle, les manuscrits non insérés pouvaient parfois être rendus à leurs auteurs.

Nullement découragé, mais ayant perdu, en 1908, le seul homme qui prêtât une oreille attentive à la lecture de mes essais, mon affectionné Maître, je décidai d'abandonner l'ingrate carrière d'électro-physiologiste amateur, qui ne semblait point destinée à m'ouvrir un brillant avenir. Et j'aurais dit adieu pour toujours à ma passion d'un moment si, dans la pratique de mon métier d'ingénieur, le hasard n'avait un jour mis entre mes mains un article fort remarquable d'A. Hess concernant la mesure des résistances d'isolement des câbles de transmission télégraphique. Cette article était inséré dans une brochure *in memoriam*, établie en souvenir de l'ingénieur distingué qu'une mort prématurée enlevait à une science dans laquelle il semblait appelé à conquérir un enviable renom. L'article de A. Hess m'apportait, quant aux résistances des diélectriques et à leurs variations, des précisions qui m'avaient manqué jusque-là. Ce fut un trait de lumière.

Tel est le sort de toutes les découvertes : il leur faut une première fois tomber dans le vide et, souvent, disparaître à jamais avant que soient révolus les temps où, découvertes à nouveau, elles commencent à s'imposer autour d'elles. J'ai pu constater, à la lecture de récents travaux sur les diélectriques, que l'article de Hess n'avait jamais atteint les spécialistes les plus

intéressés à en posséder les résultats. Mais il contenait, en substance, une part essentielle des théories dont le développement est donné dans le présent ouvrage : il était donc juste que l'auteur rendît cet hommage posthume à son infortuné confrère.

Mis en mesure de perfectionner mon premier ouvrage, je n'y manquai point, dans les loisirs que me laissaient des occupations par ailleurs fort absorbantes. A nouveau, la guerre me fit tout abandonner. Cependant, toujours curieux de ce qui pouvait se rattacher au problème qui m'avait passionné, plusieurs années durant, je me procurai vers 1920 un ouvrage intitulé *Studies in Electro-physiology*, publié depuis peu de temps par un ingénieur télégraphiste anglais, ARTHUR BAINES. Comme moi-même et, je le crois fermement aujourd'hui, comme tout électricien professionnel qui s'attaquerait à la solution d'une telle question, A. BAINES arrivait à cette conclusion : le muscle ne pouvait être autre qu'un condensateur électrique. Quoique l'exposé de BAINES fût fort incomplet par rapport à ce qu'on pouvait dire sur un tel sujet, j'estimai qu'il m'enlevait tout souci de publication de mes propres travaux. Les *Studies in Electro-physiology* me semblaient apporter à la science physiologique l'hypothèse coordonnée dont elle avait besoin concernant la dynamique musculaire. Il n'y avait qu'à laisser faire le temps...

Les années ont passé. De plus en plus curieux de littérature biologiste, j'ai lu de récents travaux sur les questions de mécanique animale et j'ai pu constater que les suggestions de BAINES, malgré le puissant intérêt dont elles étaient empreintes, n'avaient aucunement attiré l'attention des spécialistes et n'avaient pas donné aux théories de la physiologie l'impulsion qu'elles étaient susceptibles de leur communiquer.

Un clou qu'on veut enfoncer d'un seul coup de mar-

teau se tord ou se casse; il n'entre dans le mur qu'à petits coups répétés. C'est pourquoi je décidai, vers la fin de 1926, de reprendre le cours de mes premières études et, si possible, de les porter plus loin que je n'avais fait jusque-là, afin que l'hypothèse, se rapprochant plus intimement de l'évidence, sa résistance à l'avancement fût d'autant diminuée.

C'est le résultat de ces réflexions, dont je me suis efforcé de faire un ensemble coordonné, que je livre maintenant à la publication. Et, pour que mon manuscrit ne me fût point refusé, je m'en suis mis l'éditeur.

Peut-être cet ouvrage n'est-il pas destiné à attirer plus puissamment l'attention que ne l'a fait le volume d'Arthur BAINES. S'il en est ainsi, quoique son auteur espère encore le contraire, il le regrettera bien plus pour l'avancement d'une science qui l'intéresse entre toutes, que pour lui-même. Élaborée dans la ferveur que peut mettre un esprit curieux de vérité au service d'une cause qu'il croit juste, cette œuvre n'est point celle d'un savant. C'est le simple fruit de l'opiniâtreté d'un homme qui, sollicité par un problème venu s'offrir à lui presque par hasard, s'est passionnément intéressé à en chercher la solution et qui, estimant avoir trouvé une partie de cette solution, s'est attaché à la rechercher tout entière.

Tout entière... C'est prononcer là une expression un peu trop présomptueuse. Une question scientifique n'est jamais résolue dans son entier; elle peut seulement l'être par rapport aux connaissances possédées dans l'instant où nous découvrons cette solution. La science est faite de relativité et non d'absolu. Résoudre un problème, c'est faire une opération analogue à celle de la décomposition d'un nombre en ses facteurs premiers, c'est ordonner, en place de la question primitive, une succession d'éléments mieux connus et plus familiers

à notre esprit. Que la science progresse et ces éléments, à leur tour, se décomposeront en d'autres éléments plus simples et plus accessibles, en sorte que les solutions aujourd'hui définitives ne demeurent, somme toute, que des solutions provisoires.

Notre ouvrage fait son apparition entre deux étapes de ce progrès qui, comme toutes les choses enchaînées au rythme de la vie, n'avance que par une série de bonds successifs. La revision s'en imposera donc dans un temps qui n'apparaît pas comme très éloigné. C'est pourquoi son auteur n'a poursuivi qu'un but, cherchant seulement à hisser sur le même palier deux sciences encore éloignées l'une de l'autre, l'électricité et la physiologie, celle-ci venant se placer au niveau de celle-là. En faisant profiter la seconde de l'avance qu'a pu prendre assez rapidement la première, grâce au puissant concours apporté par la mathématique, les deux sciences pourront, dans la suite, gravir ensemble les étages plus élevés.

Hystérésis cérébrale

La théorie électro-mécanique des phénomènes de la vie, théorie dont nous donnons ici le premier aperçu — le plein développement en devant être réservé pour les volumes suivants — cette théorie rompt trop brusquement avec les théories chimique et thermodynamique, seules en honneur aujourd'hui, pour que l'auteur ait quelque espoir de la faire accepter d'emblée. C'est, en effet, une loi constante que toute idée nouvelle se heurte inévitablement à l'obstacle, parfois insurmontable, des idées « reçues ».

Quoique l'auteur n'ait pas eu besoin d'arranger la nature pour la mettre en harmonie avec les vues dont il fournit ici le développement et qu'il se soit, au contraire, attaché à démontrer que les manifestations électriques de la matière vivante, constatées expérimenta-

lement, sont rigoureusement celles que pouvaient faire prévoir les lois les plus incontestables de la science physique, il ne sera donc aucunement étonné si l'inévitable se produit et si son travail est accueilli avec la plus parfaite indifférence ou sont discutés ceux de ses éléments lui apparaissant comme les moins discutables. Sa philosophie l'empêchera d'en concevoir la moindre aigreur. Il sait que la machine animale construite, quoique avec d'autres matériaux, sur le même plan que toutes les autres machines a, comme elle, ses résistances passives et son inertie.

Il y a longtemps déjà que l'assimilation du muscle avec un condensateur à diélectrique élastique et perméable a été verbalement exposée par l'auteur à des physiologistes. Il n'a pu réussir à intéresser aucun d'eux au delà de la mesure qui convient lorsque l'on consent à marquer quelque politesse envers son interlocuteur...

C'était sans doute mieux ainsi. Chaque chose doit venir à son heure, et je m'étais montré trop pressé. Ces sortes de résistances, que les mécaniciens ont dénommées « passives », ne sont pas aussi nuisibles que certains se plaisent à le dire. Lorsqu'on pénètre au fond des choses, on s'aperçoit que, sans l'inertie et sans ces résistances que nous avons rendues parfaitement utiles, il n'y aurait pas de mécanisme possible : le véhicule ne roulerait pas, l'animal ne pourrait se déplacer, la vie n'aurait jamais existé.

Cette inertie cérébrale de l'homme, qui l'empêche d'admettre sur-le-champ certaines idées nouvelles, cette résistance passive à les faire immédiatement siennes, n'est pas une faiblesse ; c'est une force, une très grande force. Sans elle, la vie intellectuelle ne serait plus, depuis longtemps, et n'aurait peut-être jamais été. Ne savons-nous pas que les mécanismes trop sensibles portent en eux-mêmes le germe de leur propre destruction ? La balance s'affole, le chronomètre se dérègle...

Un auteur doit avoir la patience d'attendre ; quand les temps sont révolus, les obstacles s'aplanissent d'eux-mêmes devant les propositions qu'il émet. S'il est sûr de son œuvre, il doit avoir la sereine assurance que ces temps viendront : un grand progrès s'assoit toujours sur « l'addition latente » de maints petits perfectionnements passés inaperçus. Le « temps perdu » n'est pas un temps gâché : c'est la période de potentialisation des énergies qui s'actualiseront à l'heure H, à l'instant précis où elles seront devenues plus fortes que les résistances passives s'opposant à leur expansion.

Et si cet auteur disparaît avant que son heure ait sonné, n'a-t-il pas trouvé sa récompense dans cette joie intérieure qui vient toujours illuminer celui qui a conscience d'avoir déchiffré une page plus avant dans le livre de la nature ?

L'expérimentation et l'hypothèse

L'objection que l'on ne manquera point de faire, dès l'abord, à la présente publication, c'est que, pour l'établir, son auteur ne s'est livré à aucune expérimentation personnelle.

C'est exact, et je ne méconnais point la gravité d'une telle objection. Mais des résultats d'expériences ont été publiés par milliers et je n'ai eu que la peine de les rassembler chaque fois qu'il était nécessaire. Au reste, professant cette opinion que les animaux ne sont point si inférieurs à l'homme, — ce parvenu de la nature, — que nous l'allons répétant à tous les échos, et convaincu que nous n'avons pas encore acquis l'intelligence de les comprendre, j'aurais considéré comme une inutile cruauté le martyre infligé à de malheureux êtres pour la seule vérification d'une théorie. C'est une honte dont, par l'habitude acquise, les hommes de laboratoire sont les seuls à ne pas mesurer l'étendue, que de semer tant

de souffrances pour recueillir, en fin de compte, de si pitoyables résultats.

Non, je n'ai pas d'expériences à produire ; si bas que l'homme les ait placés sur le degré de l'échelle dont il s'est octroyé le sommet, j'ai laissé les grenouilles et les chiens, les cobayes et les tortues vivre leur vie naturelle. Ainsi, si je me suis abusé, je n'aurai aucun remords à en concevoir, et c'est déjà quelque chose.

Il faut avoir le courage de le dire ; c'est à la fois un bas esprit d'imitation et un bien sot respect humain qui ont conduit la science expérimentale vers des excès qu'elle connaît actuellement et qu'il faut déplorer. La peur de l'erreur, et du ridicule que certains y attachent avec une hargneuse mesquinerie, cette peur a jugulé, réfréné, ralenti jusqu'aux confins de l'arrêt total le rôle si puissant de l'hypothèse scientifique. La crainte d'un mal nous conduit souvent vers un pire... Plus d'erreurs ont été commises encore par les purs expérimentateurs, par ceux qui travaillent à tâtons, en aveugles, et besognent à accumuler des détails qu'aucun lien ne rattache entre eux.

DESCARTES, NEWTON, LAVOISIER n'ont-ils pas, dans leurs hypothèses, laissé certaines erreurs se glisser parmi les éclatantes vérités qu'ils révélaient ? Leur gloire est bien au-dessus de ces faiblesses. Et ce ne sont pas quelques quinquets fumeux qui peuvent ternir l'éclat d'une brillante illumination.

La tendance actuelle, où l'on se pique de croire aux seuls faits accomplis, est aussi funeste dans la science qu'elle peut l'être en matière politique. Supprimer la prévision, c'est éteindre le phare qui doit tracer la route à suivre. Qu'il soit donc permis d'espérer voir poindre le jour où la science française, reprenant ses traditions séculaires, renoncera à l'outrancière expérimentation. Certes, les mesures sont une nécessité et l'on doit se ranger entièrement à cette parole de lord KELVIN : *On*

ne connaît bien un phénomène que lorsqu'il est possible de l'exprimer par des nombres. Mais cette parole a été dite pour des sciences constructives ; et la physiologie n'est pas encore à la veille de se rattacher à ces sciences-là.

La mesure doit être une opération de vérification et de rectification des théories préconçues. Comme méthode de découverte, elle révèle sa flagrante infériorité au regard du travail cérébral et ne pourra jamais atteindre à la puissance créatrice de l'induction, de la déduction et de l'intuition. Tout au plus peut-elle se contenter de venir à leur secours en les empêchant de s'engager trop avant sur les chemins sans issue.

Essayez-vous une machine à vapeur en alimentant sa chaudière à l'éther sulfurique, pour voir ce que cela donnera ? Ou tente-t-on de nettoyer des vitres au jet d'une pompe électrique de cent chevaux ? Assurément non. C'est cependant une telle expérience que l'on répète chaque jour, dans de trop nombreux laboratoires avec l'espoir, sans doute, qu'un complaisant hasard mènera sur la trace d'une découverte nouvelle. Quand toutes les combinaisons auront été essayées, la vérité consentira peut-être à se faire jour... De même que le cambrioleur, pour qui le temps est un grand maître, ne le gaspille pas en essais infructueux à chercher le secret d'un coffre blindé et préfère, de son chalumeau, découper l'ouverture qui le mènera droit au but convoité, de même le savant doit essayer d'atteindre la vérité en s'aidant de cette flamme puissante qu'est l'hypothèse. Il faut savoir courir le risque de trouver un coffre vide...

Oui, c'est bien le respect humain, et non point la paresse ou l'incapacité, qui a conduit tant de chercheurs vers cette méthode de moindre résistance apparente qu'est l'expérience de laboratoire. Mais l'outil est trop faible et la matière trop résistante. Avec ces poussières

de vérité qui viennent s'entasser les unes à côté des autres, il ne sera jamais possible de constituer ce bloc inattaquable d'une science positive comme l'est, par exemple, la mécanique. Ce n'est pas dans la patrie de penseurs de l'envergure d'un PASCAL ou d'un DESCARTES, grands faiseurs de théories, ce n'est pas en France que nous devons renoncer à une méthode si féconde, et productive quelquefois même en raison des erreurs qu'elle enferme.

La valeur d'une hypothèse se mesure, en effet, à sa fécondité, au nombre de faits nouveaux et importants qu'elle permet d'induire, puis de vérifier et de comprendre provisoirement. Ces faits sont la substance dont sera faite la science du lendemain. Une théorie neuve, même quand elle ne mène à rien de positif, a toujours ce mérite d'aider à jeter bas certains raisonnements qui apparaissaient d'une irréfutable logique et qui, tout à coup, se révèlent faux par quelque point. Cette manière de nettoyage par le vide aide la science à s'épurer et la débarrasse de la multitude des détails tendant à provoquer son encombrement.

C'est pitié, de constater combien l'électrophysiologie a peu progressé depuis DU BOIS-REYMOND, alors que l'électricité réalisait les importantes conquêtes que l'on sait. Il faut en chercher la faute dans cette sorte de castration de l'esprit scientifique qui a empêché la spéculation de marcher de pair avec l'observation. Or, leur association étroite constitue la seule base du progrès. AMPÈRE, FARADAY et leurs successeurs n'ont pas craint de faire des hypothèses hardies, qui demeurent encore solides après cent ans écoulés. Il est possible qu'un jour ces hypothèses s'effondrent et soient réduites à néant. Il n'en reste pas moins que l'industrie électrique, née de ces hypothèses, demeurera le plus beau patrimoine de l'humanité.

Et pendant ce temps, qu'a fait la physiologie, si ce

n'est de tourner en dérision la théorie électrovitaliste qui date de deux cents ans, la théorie du fonctionnement cérébral qui en a cent cinquante, et auxquelles il va bien falloir se rallier de nouveau, car ce sont les seules qui soient susceptibles de serrer de près les réalités.

Oscillations du progrès

Tel qu'est bâti notre monde, la ligne droite n'y est jamais le plus rapide chemin d'un point à un autre et la trajectoire rectiligne est plus onéreuse que d'autres courbes de jonction. On arrive plus vite à cheminer en lacets et le rythme directeur du mouvement sinusoïdal est le maître souverain de ce progrès qui s'inscrit en ondes amorties de part et d'autre de l'axe de la vérité.

Le rythme naît de l'antagonisme de ces deux forces égales et directement opposées que, selon les cas, nous appelons analyse et synthèse, déduction et induction, jugement et imagination, ou, si nous nous transportons du spirituel au réel, nous nommons expérimentation et hypothèse, pratique et théorie.

C'est folie que vouloir éliminer l'une au seul profit de l'autre, alors qu'elles doivent marcher de pair. La seule expérimentation stabilise la science; elle l'encombre, la cristallise, l'encroûte; la seule hypothèse risque de l'affoler. Mais l'une corrigeant l'autre, la science avance par ondulations, avec une cadence d'autant plus accélérée que la pratique et la théorie se lient en un accord plus intime. Ainsi sont évités ces dangereux récifs que constituent et l'obscurité de l'analyse poussée vers ses limites extrêmes, et les vues chimériques de la synthèse érigée en système absolu.

Le détail tue l'ensemble... L'essentiel n'est jamais de savoir beaucoup de choses, mais de pouvoir situer exactement les notions qu'on possède par rapport aux phénomènes généraux sur lesquels s'appuie la science.

L'enfant ne voit que des détails. De même, une science qui en est encore à son balbutiement se plaît à collectionner des faits, à amasser des particularités, à cultiver des parcelles. Or, les faits ne sont en eux-mêmes que des infiniment petits appartenant à divers ordres. Les placer les uns à côté des autres, sur le même plan, n'est point besogne scientifique : c'est celle d'un amateur de papillons ou de timbres postaux. La science n'apparaît qu'à dater du jour où, s'asseyant sur une théorie générale qui lui permet de ne pas confondre la n^{me} décimale avec le nombre entier et de négliger les infiniment petits des ordres supérieurs, elle peut procéder provisoirement à l'élimination de tous les faits n'appartenant pas à l'ordre de grandeur qui constitue son essentiel et lui donne son homogénéité. Elle tend alors à réduire les phénomènes à un petit nombre — le plus petit possible — de lois essentielles régissant tous les faits expérimentalement constatés et dont chacun d'eux n'est que l'image d'une des multiples combinaisons auxquelles conduit le jeu des lois primordiales.

La méthode scientifique est née d'un des besoins les mieux affirmés de l'intellectualité humaine. Limité dans sa capacité, notre cerveau recule devant l'amoncellement des faits, et, machine non dépourvue de résistances intérieures, il recherche la simplification du travail auquel nous le soumettons. Classement, réduction, généralisation, ce sont là des préparations nécessaires à mieux emmagasiner les concepts, à en posséder l'inventaire et à en faciliter les accouplements qui permettront d'engendrer de nouveaux concepts et de voir toujours plus avant.

Lorsque l'amas des faits s'assemble en un inextricable fouillis, lorsque pour cataloguer ces faits chacun d'eux apporte avec lui le mot qui l'exprime au lieu de l'explication qui le ferait comprendre, on ne fonde pas une science et l'on se contente de forger un vocabulaire de

néologismes, ce qui est bien la forme la plus rebutante du savoir hermétique.

La science quitte son moyen âge, période ingrate de son existence, et sa renaissance s'affirme avec l'apparition des notions simples, claires, nettement ordonnées, s'entraînant en une suite de règles générales se déterminant l'une l'autre. Alors, le cerveau cesse d'être inquiet et dérouté, car il se sent en possession d'un outil puissant, capable de l'aider à vaincre les difficultés offertes en si grand nombre par les cas particuliers. Dépourvu des repères tracés par la théorie, le chercheur hésitant n'aboutit qu'à des résultats confus, négatifs ou contradictoires.

Le désir d'aboutir rapidement est une des caractéristiques de notre époque, et c'est là qu'est la cause de tout le mal. Pour trouver plus vite, pour forcer la découverte, on aborde les problèmes de plain-pied, dans leur énorme complexité et l'on ne s'arrête guère à en distinguer les facteurs premiers; qu'on pourrait attaquer un à un, patiemment. Et voilà pourquoi la science piétine, puis s'enlise, entassant des Péliions de faits sur des Ossas de constatations stériles. Le fil conducteur manque et personne ne veut s'arrêter à le chercher, fort de cette croyance que l'expérimentation est le chemin le plus court, alors qu'il est le plus rude en même temps que le plus long.

Et ce n'est pas sans tristesse que l'on vient après cela constater qu'après avoir côtoyé de près la vérité, la science s'en éloigne à pas toujours plus grands. Pourquoi n'a-t-on pas cherché à mettre certaines théories anciennes en accord avec les progrès de l'anatomie, d'une part, avec ceux des sciences physiques, d'autre part? Cette revision aurait gagné un demi-siècle à l'avancement de certaines connaissances et aurait montré que les matériaux nécessaires à une telle syn-

thèse attendaient à pied d'œuvre qu'on daignât les utiliser.

Chaque action comporte sa réaction, comme chaque progrès entraîne une régression équivalente : la spécialisation effrénée, qui est à la mode du jour, accélère l'évolution de la science dans ses détails, mais est bien près de la retarder dans son ensemble, en empêchant ces rapprochements d'idée à idée qui sont le seul mode générateur de vues neuves sur des questions éternelles. Et le vingtième siècle a encore de grandes leçons à prendre du dix-huitième siècle.

Quand les doctrines se heurtent, il en jaillit toujours quelque lumière nouvelle. L'absolutisme scientifique, rejeton de l'école unique, mène vers cette croyance qu'une seule théorie est en mesure de tout expliquer et aboutit inévitablement au fétichisme scientifique. Ceux qui savent s'en dégager s'aperçoivent ensuite que, dans chaque théorie abandonnée s'enfermait un germe de vérité, susceptible de féconder une théorie nouvelle. Une doctrine chassait l'autre, une nouvelle erreur s'installait sur les débris de l'ancienne : le cerveau humain est à la fois trop prompt et trop impatient pour laisser mûrir une idée jusqu'à ce qu'elle ait acquis son plein développement. Il préfère se jeter vers un fruit plus vert et qui lui semble enfermer plus de promesses.

Une jonction nécessaire

C'est un fait constant, et maints exemples en pourraient être fournis, que, si nous ne comprenons pas un phénomène, les explications que nous tentons d'en donner sont toujours beaucoup plus compliquées et mystérieuses que ne l'est la simple réalité. Nous prêtons à la nature une richesse de moyens qu'elle ne possède assurément pas. Derrière la multiplicité de ses expressions agissent seulement un petit nombre de lois, tou-

jours les mêmes, et qui sont formulées dans tous les traités de mécanique.

Faites l'inventaire de toutes les découvertes de la science, examinez les hypothèses remplacées par une connaissance plus intime des choses et vous vous apercevrez que nos suppositions n'ont jamais approché la splendide simplicité de la vérité.

Mais, de même qu'il ne suffit pas, pour composer un chef-d'œuvre épique, d'avoir à sa disposition un dictionnaire des rimes, de même, ce n'est pas assez, pour expliquer convenablement la nature, de posséder les lois de la mécanique. Si nous tendons toujours à ramener les sciences naturelles dans le cadre des sciences physiques, et celles-ci dans le cadre de la science du mouvement, le terme ultime de cette évolution n'est pas encore à portée de notre vue, et nous ignorons s'il le sera jamais.

Il apparaît toutefois que les sciences exactes et les sciences d'observation gagneront, les unes et les autres, à resserrer leurs contacts ou à les établir d'une manière toute différente de celle dont ils ont été assurés jusqu'à ce jour. Ici encore, comme je n'ai pas craint de le faire précédemment, il me faut dire toute ma pensée.

En m'élevant tout à l'heure avec tant de véhémence contre les abus de l'expérimentation et contre la tendance, si fâcheuse pour l'avenir d'une science, qu'ont ses desservants à négliger les travaux spéculatifs, j'ai la certitude d'avoir exprimé en toute franchise ce que d'autres pensent et n'osent dire. N'ayant pas de situation officielle à ménager, n'attendant ni honneurs, ni profits d'une œuvre que j'ai dressée pour ma seule satisfaction personnelle, je n'ai aucun mérite spécial à prononcer des vérités qui ne manqueront pas d'être taxées d'exagération par quelques-uns d'entre ceux qui voudront bien me lire.

Loin d'avoir un tempérament démolisseur, je ne me

plais, au contraire, qu'en essais constructifs. Si j'ai signalé ce qui me semblait être le mal, je suis heureux d'en arriver maintenant à exposer ce que je crois représenter la bonne direction, le moyen qui mènera rapidement vers le mieux. Ce mieux, il faut le voir dans l'étroite collaboration des sciences exactes et des sciences d'observation.

D'aucuns penseront que c'est chose déjà faite et que je me pose ici en enfonceur de portes ouvertes. Je ne le crois pas. Certes, les physiologistes comptent dans leurs rangs d'éminents mathématiciens, de distingués physiciens et chimistes et, à cet égard, le contact entre les divers ordres de sciences est aussi parfaitement établi qu'il est possible. Pourquoi les résultats qu'il donne ne sont-ils pas meilleurs ? Parce que les physiologistes sont des théoriciens de la mathématique ou de la physique, mais des praticiens de la seule physiologie. Ils n'en sont pas encore à être les ingénieurs de la machine vivante.

Prenez, au contraire, un mécanicien ou un électricien : s'il a été contraint d'étudier l'algèbre ou la thermodynamique, la géométrie ou l'optique, ce n'a jamais été que dans le but utilitaire d'être un constructeur, quelquefois même un inventeur de machines. S'il use de la mathématique ou de la physique, c'est toujours pour les appliquer à des réalités qui, venant immédiatement corriger ses calculs et ses prévisions, lui enseignent à rectifier rapidement des erreurs que l'âpre concurrence industrielle ne peut tolérer. Le savoir de l'ingénieur est un savoir d'applications : pour lui, le chiffre est seulement l'expression d'une réalité et l'expérience marche de pair avec la théorie.

Une telle méthode donne une grande force, car elle permet de ne jamais perdre ce bon sens qui s'effrite toujours un peu lorsqu'on se contente de forger l'instrument sans avoir à s'inquiéter comment et à quoi il

devra servir. Il faut donc instaurer l'ère d'une collaboration entre le physiologiste et l'ingénieur, car ce frottement de cervelles, comme a dit MONTAIGNE, est la chose la plus profitable aux progrès de notre entendement.

La physiologie du mouvement et celle des sensations ne sont que des problèmes particuliers analogues à ceux que la télégraphie électrique pose depuis quatre-vingts ans à ses spécialistes. Au lieu de persister dans cette erreur formidable que l'influx nerveux ne peut être de nature électrique, parce que l'électricité se transmet à la vitesse de 300000 kilomètres par seconde, tandis que l'influx nerveux ne progresse, dans le même temps, que de 30 ou 40 mètres chez les mammifères, pourquoi les physiologistes ne se sont-ils pas adressés à un ingénieur pour la résolution d'un tel problème ? Depuis longtemps, déjà, ils sauraient que, seules, les ondes électromagnétiques se déplacent dans l'éther à la vitesse de la lumière, mais que le signal électrique lancé à travers un câble sous-marin va infiniment plus lentement, ne donnant jamais une communication instantanée entre Paris et New-York.

L'auteur du présent ouvrage est un ingénieur tout à fait modeste et ne brillant d'aucune lumière spéciale dans sa profession. Il lui a suffi de se poster à l'angle de deux chemins pour apercevoir immédiatement les rapprochements qui s'imposaient entre certains phénomènes physiologiques et d'autres phénomènes, connus des électriciens. Il n'a fait que, dans son petit coin, recueillir des évidences et les classer avec quelque méthode. A quels pas de géant n'avancera-t-on pas le jour où ces mêmes investigations se poursuivront par la collaboration de cerveaux puissants, venus, les uns de la physiologie et les autres des applications de la mécanique, de l'électricité ou de la chimie ?

On voit ce qu'y peut gagner la physiologie. L'art de

l'ingénieur n'y gagnera pas moins. Le corps de l'animal est, en effet, la plus admirable collection de mécanismes qui se puisse imaginer. Si l'on a pu constater que certains dispositifs animaux se trouvent être absolument analogues à d'autres dispositifs que l'homme, à force de patience et d'ingéniosité, a pu réinventer sans se douter qu'il accomplissait un travail parallèle à celui de la nature, combien plus nombreux encore sont les dispositifs pour lesquels le parallélisme exact, du naturel à l'artificiel, n'a pas été identifié ! Combien de machines nouvelles restent à réaliser par un simple pastiche de la nature !

Complication croissante du mécanisme artificiel

Nous sommes habitués à creuser un fossé profond entre les mécanismes vitaux et ceux qu'a pu réaliser le génie humain. Si grande que nous apparaisse encore cette distance, elle va tout de même en s'affaiblissant chaque jour : la coupure qui séparera longtemps encore les mécanismes animés des mécanismes artificiels restera-t-elle infranchissable et connaissons-nous quelque jour le miracle de la mise en route des énergies cosmiques ? Bien présomptueux, celui qui affirmerait comme prochaine — plus simplement même, comme probable — la solution d'un problème dont l'insolubilité paraît plus grande à mesure qu'on le scrute de plus près.

Il n'en reste pas moins que, chaque jour, nous apprenons à faire un peu mieux les travaux dont la nature nous a fourni le modèle. C'est une croyance assez répandue et complètement erronée que de croire dirigée vers une simplification toujours plus grande l'évolution des machines établies aujourd'hui et c'est, au contraire, vers une complication de plus en plus affirmée que se marquent les tendances constructives. Et plus la

simplicité s'affirme dans l'aspect extérieur ou dans le maniement, plus le nombre des organes et leur enchevêtrement intérieur, plus le nombre des fonctions accomplies et l'automatisme de marche s'en vont grandissant. Quand les machines se perfectionnent davantage, elles deviennent plus « vivantes », parce que leurs facultés d'adaptation à la multiplicité des circonstances extérieures deviennent plus rapides, plus précises, plus aisées et, en même temps, moins dépendantes de notre contrôle constant.

Mesurez le chemin parcouru sur une telle voie, de la machine de NEWCOMEN à la locomotive moderne, du téléphone de BELL au « multiple » automatique d'aujourd'hui, de la lampe à filament de carbone au jeu d'orgue lumineux d'un théâtre, du premier aiguillage aux enclenchements et aux verrouillages d'un poste actuel, de l'automobile de 1898 à celle de 1927... Oui, mesurez ces progrès étonnants accomplis à un rythme qui semble aller toujours en s'accélégrant et vous serez obligé de convenir que la synthèse dont l'aboutissement nous entraîne vers la création de la vie artificielle avance beaucoup plus vite que l'analyse de la vie naturelle.

PHILOSOPHIE DES MÉCANISMES

Avant d'aborder l'étude de la dynamique musculaire, nous devons dire ici quelques mots de l'esprit qui a présidé à la rédaction de ce travail. Cela nous paraît d'autant plus nécessaire que le présent ouvrage est, sans doute, la première tentative faite en vue de ramener la mécanique des moteurs vivants dans le cadre d'exposition qui est habituel à la mécanique générale et aux moteurs inanimés, comme la machine à vapeur, le moteur à explosions ou le moteur électrique. On ne s'étonnera donc pas si nous nous croyons obligé de rompre avec quelques-unes des directives qui ont inspiré nombre de recherches physiologiques et que nous ne croyons pas orientées dans le sens qui pourra en rattacher étroitement les résultats à ceux déjà acquis dans l'examen des machines ordinaires.

Dans l'étude des groupes dynamogènes, il est commode de distinguer deux sortes d'appareils dont les fonctions, sans être de nature essentiellement différente, représentent cependant deux stades successifs dans le cycle des transformations de l'énergie :

- 1° Les appareils de production, ou la *source d'énergie* ;
- 2° Les appareils d'utilisation, ou le *moteur* proprement dit.

Tous les appareils de production ne sont, en définitive, que des transformateurs d'un mode d'énergie en un autre mode. Mais, alors que les uns — chaudières à vapeur, piles, etc., — sont des transformateurs immé-

diats, utilisant l'énergie à l'instant de la transformation, d'autres — les accumulateurs électriques, par exemple — sont des transformateurs différés pouvant retarder le moment de l'utilisation. A cet égard, on peut considérer le charbon comme un transformateur différé d'énergie solaire.

Les appareils d'utilisation, qui comprennent à la fois les appareils distributeurs — fixes — et les organes récepteurs — mobiles — rendent de l'énergie mécanique immédiatement utilisable au fur et à mesure qu'ils reçoivent de la source une énergie, soit de même nature comme la force vive de l'eau ou de la vapeur, soit d'une nature apparemment différente, comme les réactions électromagnétiques.

La source d'énergie qui alimente la machine animale est évidemment, si nous la considérons dans son ensemble, un transformateur différé. Ce n'est, en effet, qu'après un temps plus ou moins long que l'énergie chimique, dont les aliments sont le substratum, est assimilée par l'organisme et convertie en ces autres formes chimiques qui pourront donner naissance au courant électrique nécessaire à la marche de la machine.

De plus, l'accumulateur animé, tout comme l'accumulateur électrique, peut conserver son énergie jusqu'au moment de l'utilisation, — dans de certaines limites, il est vrai, pour l'un et pour l'autre, et avec des pertes qui s'accroissent avec le retard apporté à leur emploi, — ou, encore, dépenser en un temps relativement court l'énergie amassée en un temps plus long.

L'appareil d'utilisation, contrairement à ce qui se passe dans la majorité des cas en mécanique ordinaire, ne fournit pas un couple disponible sur la jante d'une poulie, mais une force. C'est la seule distinction que nous aurons à faire entre les deux classes de moteurs.

Statique, cinématique, dynamique

La statique doit être considérée comme une science purement spéculative, dans laquelle nous faisons abstraction des contingences de notre monde pour nous placer dans certaines conditions idéales, qui facilitent l'exposé des lois de la mécanique. Elle n'a donc aucune réalité : il est impossible de séparer l'idée de force de celle de ses effets ; mais cette notion permet d'abrégier des énoncés qui, sans son emploi, seraient longs et obscurs.

L'habitude a été prise, en physiologie, d'opposer phénomènes statiques et phénomènes dynamiques ; nous devons rejeter cette erreur : il n'y a, en mécanique, que des effets dynamiques, qui sont tantôt d'ordre statique, tantôt d'ordre cinématique. Il n'est pas inutile de nous expliquer sur ce point.

Par sa définition même, la notion du travail comporte tout à la fois l'idée de force et celle de chemin parcouru. Si nous prenons un poids sur le sol pour le poser sur une table, il est incontestable que nous avons accompli un certain travail, mesuré par le produit du poids et de la hauteur à laquelle il a été élevé. Mais si, au lieu de poser ce poids sur une table, nous le soutenons à une hauteur invariable pendant un certain temps, est-ce à dire que, cette fois, nous n'avons fourni aucun travail ? Certains le croient, par une fausse interprétation des définitions et au risque de froisser le bon sens le plus élémentaire.

Si nous appliquons à un point matériel une force constante en grandeur et en direction et que cette force soit libre d'agir, elle communique au point matériel un mouvement rectiligne uniformément accéléré. Pour empêcher cette force de manifester ses effets, il nous suffit évidemment de lui opposer une autre force égale et de direction opposée.

Quelle force pouvons-nous opposer à un poids pour l'empêcher de tomber ? La force portante d'un électro-aimant, par exemple, ou, par un dispositif analogue à celui du frein de PRONY, le bras de levier d'un couple de rotation. De toute façon, pour entretenir cette force antagoniste, nous serons astreints à une certaine dépense d'énergie ; le travail fourni sera celui qu'absorbe la résistance électrique de l'électro-aimant, ou celui des frottements dans le frein dynamométrique. Ainsi, *ce travail est celui qui est engendré par les résistances passives du mécanisme employé.*

Un ressort tendu travaille ; quand les molécules ont fourni leur énergie disponible pour ce travail, le ressort se brise. La table sur laquelle repose un poids travaille et se déforme à la longue. Le système solaire lui-même travaille pour entretenir la pesanteur pendant que nous travaillons à soutenir une charge. Ainsi donc, *l'entretien* d'une force — et non la création, qui nous est rigoureusement impossible, — nous coûte toujours une certaine dépense d'énergie, parce que nous ne pouvons faire que les résistances passives intérieures des systèmes que nous mettons en jeu soient rigoureusement nulles.

Fonctionnement statique et fonctionnement cinématique

Les moteurs fonctionnent selon deux modes différents, statique et cinématique, ces deux modes constituant l'un et l'autre des fonctionnements dynamiques.

Une machine est en fonctionnement statique quand toute l'énergie fournie par la source aux appareils récepteurs est transformée en chaleur dans le sein de ces appareils, et ceci pour annihiler à tout instant les effets d'une force dont le point d'application reste fixe.

Ainsi, un moteur thermique, hydraulique ou élec-

trique, sur le volant duquel est équilibré un frein dynamométrique, est en fonctionnement statique. En effet, toute l'énergie motrice est employée à opposer, à tout instant, au couple de renversement de position invariable créé par un poids P , un couple de frottement égal et directement opposé. Toute l'énergie dépensée est transformée en chaleur rayonnée dans le milieu ambiant par la jante de la poulie.

Un autre exemple nous est fourni par le freinage des véhicules. Supposons que l'on freine après débrayage, le parcours s'effectuant en palier. La source d'énergie est ici la force vive du véhicule en mouvement, le train des roues constituant l'appareil d'utilisation. Au couple de rotation de cet appareil, on oppose, à tout instant, un couple de frottement de position fixe par rapport à l'ensemble du système. La force vive est intégralement transformée en chaleur rayonnée par les garnitures et tambours de frein et par les bandages des roues. Il convient de remarquer que l'arrêt est obtenu parce que la force vive du véhicule est une quantité limitée.

Ces exemples, qu'il est inutile de multiplier, nous montrent quel sens exact, qui n'est nullement incompatible avec l'idée de mouvement, nous devons attribuer au fonctionnement statique.

Une machine est en fonctionnement cinématique quand la majeure partie de l'énergie fournie par la source aux appareils d'utilisation est transformée en chaleur en dehors de ces appareils, et ceci pour annihiler à tout instant les effets d'une force dont le point d'application est variable.

C'est le mode de fonctionnement usuel des machines. Il est trop connu pour que nous insistions. Cependant, pour bien préciser le sens qui s'attache à la définition donnée, examinons un cas particulier quelconque.

Soit un moteur commandant une machine-outil, une perceuse par exemple. Au couple de rotation du moteur

sont opposés divers couples qui, en dernière analyse, peuvent se réduire à un couple unique de frottement, couple dont le bras de levier se déplace parallèlement à lui-même en même temps que la mèche pénètre dans la masse de la matière à ouvrir. L'énergie du moteur est transformée tout entière en chaleur rayonnée par sa mèche et la matière travaillée. S'il s'agit d'une masse métallique, elle pourra rougir et fondre. L'emploi des lubrifiants, en réduisant le couple de frottement, diminue la puissance nécessaire au perçage et, conséquemment, la quantité de chaleur produite.

Dégradation d'énergie et trace

Avant d'appliquer aux machines animales les principes ci-dessus énoncés, hâtons-nous de remarquer que la distinction des deux modes de fonctionnement, statique et cinématique, est une distinction de forme, mais non d'essence.

En effet, si, dans le mode statique, l'apparition de chaleur est immédiate, alors que dans le mode cinématique elle peut être plus ou moins différée, la fin de toutes les énergies qui se manifestent est nécessairement la forme dégradée que nous appelons chaleur. Mais, toujours, cette dégradation laisse après elle une trace, un fait accompli, contre lequel nous ne pourrions revenir, et dans quelques cas seulement, qu'en faisant appel à une nouvelle quantité d'énergie.

Ainsi, et nous aurons souvent à le rappeler au cours de notre étude, tout travail se résout en chaleur et trace, *empreinte*, fait accompli...

Ce fait, c'est, dans le freinage, l'usure des freins et des bandages ; dans le calage d'un moteur électrique, c'est la destruction des isolants ; dans l'emploi de la perceuse, c'est la matière enlevée. L'apparition de chaleur est le tribut que nous sommes obligés de payer aux ré-

sistances passives des systèmes que nous avons asservis.

On voit dès lors que les deux modes de fonctionnement ne vont point l'un sans l'autre et que toute machine en marche normale, c'est-à-dire travaillant mécaniquement, est astreinte au fonctionnement statique dans la mesure où elle comporte des résistances intérieures, sources immédiates d'une chaleur dont l'usure des pièces frottantes est la trace.

Aucun système n'échappe à cette loi : ni le ressort tendu, ni le fil de caoutchouc soutenant une charge, ni le muscle portant un poids. Ici encore nous trouverons la preuve d'un travail intérieur dans la déformation permanente qui apparaît au bout d'un temps plus ou moins long et cette déformation, ce vieillissement, est la trace d'une chaleur qui, pour avoir échappé à toute mesure, n'en a pas moins fait son apparition.

De ceci, un fait nous reste acquis, c'est que *la mesure de la chaleur dégagée par un système en fonctionnement statique est celle des résistances passives intérieures du système*. Celui-ci sera, toutes choses égales d'ailleurs, pourvu d'un rendement d'autant plus élevé que la chaleur dégagée sera moindre.

Travail statique. Travail stérile

Pouvons-nous logiquement dire que le travail nécessité par un fonctionnement statique est un travail stérile ? Non : en fin de tout, il n'y a purement et simplement que des travaux, dont nous savons plus ou moins bien tirer profit. Le mécanicien n'est donc pas digne de ce nom s'il ne se double, en même temps, d'un économiste.

Un exemple, entre plusieurs autres, très frappant, nous montre qu'un travail dit *stérile* peut devenir parfaitement *utile* : une dynamo génératrice dont le circuit

se ferme sur des résistances mortes a travaillé stérilement jusqu'au jour où ÉDISON en a fait le principe de l'éclairage à incandescence, la plus belle application, peut-être, de l'effet Joule.

L'ordre statique des travaux, tout comme les notions de *continu* ou d'*infini*, est une apparence qui facilite certaines explications. A un grossissement approprié, nous verrions que tous les travaux appartiennent à l'ordre cinématique.

La fusion imparfaite des secousses, qui fait son apparition avec la fatigue, nous le montre nettement. Les oscillations autour d'un axe fixe, virtuelles dans le tonus ou le tétanos parfait, deviennent réelles et visibles quand la fréquence des courants cycloïdaux s'abaisse.

Ces oscillations virtuelles se retrouvent partout devant nous dès que nous scrutons attentivement les phénomènes, et elles sont l'essence même de la vie. Là où nous pouvons les déceler, là où nous pouvons retrouver le rythme, la cadence potentielle ou réelle, nous avons levé une partie du voile qui recouvre des faits jusqu'alors inexpliqués.

Économie du fonctionnement pulsatoire

Jusqu'à présent nous n'avons parlé que de mouvements translatifs ou rotatifs *continus*. La mécanique étudie également les mouvements pendulaires, ou oscillatoires. Il existe une autre classe de mouvements dont l'examen est particulièrement intéressant dès qu'il s'agit de phénomènes biologiques : ce sont les mouvements *pulsatoires* ou cycloïdaux.

L'étude des pulsations, qui est celle des phénomènes discontinus et des rythmes, est susceptible dans ses développements d'ouvrir à la science mécanique des horizons encore insoupçonnés. De l'artificiel que nous avons créé, elle nous mènera vers le réel où nous

sommes et dont nous commençons à peine à entrevoir les rouages qui l'entraînent. Nous nous limiterons ici à ce que nous croyons utile pour une bonne compréhension du mode de travail des moteurs vivants.

Un phénomène continu se manifeste sans aucune interruption ; un phénomène peut être continu sans être continu : il sera continu s'il se reproduit identique à lui-même à des intervalles égaux, s'il affecte une allure rythmique ou pulsatoire. En dynamique, cette distinction est fort importante, car une force qui serait continue produirait ou l'équilibre proprement dit, ou bien un mouvement uniformément varié, tandis qu'une action intermittente engendre des oscillations donnant lieu à des travaux très particuliers, soit en qualité, soit en grandeur kilogrammétrique.

Si nous quittons le domaine de la mécanique élémentaire pour nous placer résolument sur le terrain des réalités, nous ne tardons pas à nous apercevoir que le mouvement dit *uniforme*, correspondant à des espaces égaux parcourus dans des temps égaux, n'est qu'un idéal jamais atteint, une pure apparence : le mouvement uniforme est inéluctablement tributaire du mouvement pendulaire. Et nous en voyons l'image non seulement dans la marche de l'horloge, mais aussi dans celle de tous les mécanismes qui nous entourent, depuis le volant de la machine à vapeur jusqu'au tétanos physiologique. La nature, elle-même, ne procède pas autrement dans les mécanismes qu'elle met en jeu : derrière l'uniformité de vitesse du son ou de la lumière dans un milieu défini, nous apparaissent les vibrations sonores ou lumineuses qui se produisent dans ce milieu... Ainsi sommes-nous amenés à penser que l'éther n'est pas un milieu plus fictif que notre atmosphère gazeuse, et qu'il possède une certaine masse, entraînant à sa suite une certaine inertie.

Considérer le temps et la longueur comme des choses

continues, c'est pure spéculation, non conforme aux réalités de notre monde. Le temps n'est rien d'autre qu'une cadence : *un phénomène ne peut exister qu'en conséquence d'un rythme. Supprimez le rythme, et le phénomène s'évanouit.* Cette loi, qui est en quelque sorte la loi suprême de la dynamogénie, est, en même temps, celle de la dynamo-économie, celle de l'obtention du maximum d'effet par la mise en œuvre du minimum de moyens énergétiques.

VIOLLE avait déjà remarqué qu'un faible effort répété peut produire des déformations que n'occasionnerait pas une force incomparablement supérieure appliquée en une seule fois.

On peut soutenir un poids, directement, sur le plat de la main, à bras tendu horizontalement. C'est la première idée qui vient et ce n'est pas la meilleure si vous voulez ménager votre effort ! Mais en procédant par une série de petites tapes rythmées, vous pourrez tripler ou quadrupler le temps de sustentation avant qu'apparaisse la fatigue invincible.

Voici mieux encore : avez-vous, par hasard, regardé le serpent qui fuit en traversant une nappe d'eau ? Il ne fend pas l'onde et la prend seulement pour appui. Son corps se replie sur l'invisible tracé d'une sinusoïde au long de laquelle il progresse avec une rapidité prodigieuse ; l'animal vous semble avoir déjà joint l'autre bord dans l'instant même où vous l'aviez vu s'élancer à la surface des eaux... C'est ainsi que le serpent justifie sa légendaire réputation de malignité, en suivant le chemin le plus rapide et le plus économique, qui est celui de moindre résistance à l'avancement. A vouloir traverser en ligne droite, il userait son énergie à s'enfoncer au sein de la rivière.

De même, la vitesse uniforme — ou apparemment uniforme — d'un volant s'entretient aux moindres frais par une succession d'impulsions espacées, transmettant

à chaque fois une nouvelle puissance vive, qui vient renouveler celle dissipée dans les résistances passives tendant à immobiliser l'appareil.

Les « montagnes russes » sont le prototype du transport économique et MAREY a mis en évidence cet autre fait, qui s'applique à la circulation du sang : l'écoulement continu obtenu à l'extrémité d'un tuyau élastique suffisamment long et alimenté par une source intermittente, est plus abondant que l'écoulement intermittent qu'on obtiendrait avec un tuyau à parois rigides.

Enfin, DUSSAUD, avec son dispositif de « lumière froide » obtenue, comme on sait, en alimentant une série de lampes à filament métallique au moyen de courants intermittents, a réalisé le mode d'éclairage nécessitant la moindre dépense d'énergie électrique et s'est placé dans des conditions approchant de très près celles qu'a réalisées le modeste ver-luisant.

En résumé, *la nature atteint toujours le maximum dans l'effet en recourant au minimum de moyens parce qu'elle emploie les énergies rythmées. Ces rythmes sont eux-mêmes déterminés par des « quanta » qui représentent le minimum d'énergie nécessaire à faire entrer en jeu ou à maintenir en fonctionnement un mécanisme qui ne peut être réalisé autrement qu'avec des résistances passives, dont le « quantum » donne la mesure.*

Nous croyons avoir suffisamment fait entrevoir sous quel aspect il convenait d'utiliser les lois inflexibles de la mécanique en vue d'arriver à une compréhension simple et rapide des phénomènes énergétiques conditionnant la vie, pour qu'il nous soit nécessaire d'insister davantage : tout le vieil arsenal de la métaphysique, — infini, continu, néant, ... — tout cela, peut-être, est appelé à se modifier pour faire place à une philosophie plus réaliste et mieux en harmonie avec ce que nous enseigne la physique. Nous essayons toujours de

chercher au loin ce qui est, la plupart du temps, à portée de notre main sans que nos yeux l'aperçoivent, et nous introduisons dans la science la fiction du roman. Les réalités sont plus simples que nos rêves. Pour l'avoir mille fois constaté, nous n'en sommes point empêchés de retourner, comme si quelque pouvoir obscur nous y contraignait impérieusement, sur les chemins où nous emmène notre imagination, qui aime à se repaître de complications.

Nous découvrirons plus vite certains secrets de la nature en observant les plus ordinaires réalités qu'en berçant notre esprit d'explications nuageuses. Nous n'avons pas à nous permettre, ici, d'extrapolation hasardée. Dans le domaine de la pure mécanique, qui délimite avec netteté notre activité présente, il n'est point de bâton qui n'ait ses deux bouts... Tout a commencé et tout finira : les énergies s'éteindront en chaleur et la matière deviendra poussière. *Memento quia in pulverem reverteris*. Sorti de l'éther, le monde y retourne : la vie n'est que la marche entre ces deux étapes, que l'accélération vers un nouvel équilibre.

MÉCANIQUE ET VIE

Degrés de la vie

Qu'est-ce donc que la vie ? A cette question, les philosophes ont répondu longuement et beaucoup mieux que nous ne le saurions faire. Pour nous, en conséquence directe des prémisses antérieurement posées, *vie* nous apparaît comme un simple équivalent de *travail*. Car la vie se résout en chaleur et en poussière, laissant derrière elle la seule trace des activités dont elle fut la manifestation sensible.

Tout vit, depuis l'humble caillou jusqu'à la cellule, depuis la rivière qui serpente jusqu'au plus fier des animaux, depuis le nuage qui passe au ciel jusqu'à l'univers qui nous entoure.

Oh ! c'est quelque chose de bien modeste, la vie d'un caillou... Mais supposez un instant que vous ayez changé l'unité de temps vous servant à apprécier l'intensité de cette vie, supposez que vous dérouliez en quelques minutes le film cinématographique enregistré en plusieurs centaines de milliers d'années et qui vous retracera l'histoire de cette pierre au travers des âges : combien sa formation, sa durée, ses transformations successives, sa disparition sous l'attaque répétée des éléments qui concourent à sa perte vous apparaîtront choses mouvantes !

N'est-ce pas une manière d'intelligence *mécanique*, cette tendance naturelle qu'a la nappe d'eau s'épandant en ruisselets sur le sol, d'épouser le tracé de moindre résistance à l'avancement que lui impose ce détermi-

nisme naturel, l'effet de la gravité ? Pour peu que le terrain présente des inégalités et lui oppose quelques obstacles, le filet d'eau ne s'en va plus en suivant strictement la plus grande pente, mais la ligne, infiniment plus complexe dans sa forme, dérivant des résistances variées qui entravent son mouvement et retardent sa chute vers le but final.

Mais voici venir les mécanismes que nous avons créés. Examinons celui qui nous est le plus familier quoique, peut-être, le moins généralement connu : la pendule, ou la montre. Curieux de son tic-tac, l'enfant demande « à voir la petite bête... » Il ne s'y trompe pas : la montre vit, et déjà nous sentons que cette vie a quelque chose de plus noble, de plus élevé que la vie du simple caillou et que celle du ruisseau, car nous en saisissons la raison d'être et le but : l'homme est le dieu qui l'a conçue et mise en route.

Le moulin, la machine à vapeur, le moteur d'automobile, toutes ces machines ont leur vie propre. Mais il nous faut arriver jusqu'au moteur électrique pour apercevoir une vie mieux organisée encore, où, sans le secours de ce mécanisme annexe qu'est le régulateur, la puissance peut s'équilibrer, dans d'assez larges limites, à la résistance variable qui lui est opposée : écoutez fonctionner le minuscule animateur d'un de ces multiples appareils domestiques dont l'usage est aujourd'hui si répandu, entendez comme le son en devient plus grave ou plus aigu, c'est-à-dire comment le moteur tourne, ou moins vite, ou plus vite, selon l'importance du travail que vous lui donnez à accomplir. Toutes ces adaptations se font automatiquement, sans que votre volonté ait à intervenir et il semble que l'appareil ait, avec l'intelligence de la tâche à remplir, une âme qui lui commande de s'assouplir à l'ambiance opposée, de vaincre et non de se laisser vaincre.

Gravissons encore quelques degrés sur cette échelle

ascendante des possibilités vitales et, devant nous, nous trouvons la cellule. Elle a sa vie, elle a sa psychologie. Mais savons-nous si cette psychologie est d'un ordre bien supérieur à celle du moteur électrique ? Savons-nous si, entre les deux ordres de phénomènes réactifs qui caractérisent, soit l'appareil électrique, soit la cellule, il existe un mur réellement infranchissable, une cloison que nos connaissances actuelles ne nous permettent pas de renverser ? Je le crois d'autant moins que le présent ouvrage a été entrepris pour démontrer le contraire.

Le pas accompli ne sera pas, d'ailleurs, aussi grand qu'on pourrait le croire dès l'abord ; nous n'aurons pas pénétré plus avant dans la solution de l'insondable problème qui se pose depuis que l'homme pense et le chemin n'aura été parcouru qu'autour du cercle hermétique qui l'enferme. Problème combien décevant : plus nous en matérialisons les données et plus nous sommes contraints d'en spiritualiser la solution...

Le rythme et la vie

Le rythme est l'essence de la vie, et le pendule est maître du monde.

La force et le couple sont les deux grands symboles de la mécanique. Figuré par deux forces égales et directement opposées, mais n'ayant pas un même point d'application, le couple naît d'une dissymétrie et engendre le tourbillon.

Quand deux forces égales et directement opposées possèdent un commun point d'application, leur résultante est nulle et le système est en équilibre. Si, quand nous déplaçons le point d'application, l'une des forces reste constante en grandeur et en direction, le système ne peut rester en équilibre qu'au cas où la force opposée se décompose elle-même en deux autres forces dont

l'une est égale et directement opposée à celle qui entraîne le déplacement du point d'application. Annulons la force qui cause le déplacement et le système tend à revenir vers sa position première, qui représente un équilibre plus simple. Ainsi naît l'oscillation.

Inversement, lorsqu'un système de trois forces concourantes est en équilibre, et que deux de ces forces tendent à se composer en une seule, c'est-à-dire à se ramener à une force égale et directement opposée à la troisième, il se crée un mouvement oscillatoire de leur point d'application. L'oscillation est donc engendrée par le passage d'un état d'équilibre vers un autre état d'équilibre, le second étant plus simple que le premier.

Une fois déclenchés, les tourbillons et les oscillations durent aussi longtemps que le leur permet le freinage dû aux résistances passives du milieu où ils ont pris naissance. Leur vie, c'est la recherche d'un équilibre nouveau, et cet équilibre est la mort.

Le couple est le symbole de l'involution ; la force rythmée, génitrice du mouvement pendulaire, est le symbole de l'évolution. L'une ne se peut séparer de l'autre, en sorte que tout est, à la fois, involution et évolution, et non point l'une à l'exclusion de l'autre. Toujours, nous retrouvons devant nous le spectacle de cette réciprocité qui fait que chaque univers est un individu et que chaque individu est, en lui-même, un univers.

A tous les degrés de l'échelle, du corpuscule au monde entier, on revoit cette même lutte entre les énergies potentielles et les énergies actuelles, où les potentielles s'actualisent et les actuelles se repotentialisent dans un balancement qui serait éternel s'il n'y avait une entropie pour amortir ce rythme. L'actualisation suivie de repotentialisation, c'est la vie qui, provenant de la dyssymétrie, du déséquilibre, se trouve faite de déformabilité, d'adaptations et de mutations.

Le but, c'est l'équilibre retrouvé, c'est la fixité dans le temps et dans l'espace, c'est la mort.

Par d'autres voies, nous sommes entraînés à nouveau vers cette conception de Claude BERNARD : « La vie, c'est la mort. »

De même que la vie est tout rythme, de même l'étape définitive de la mort, la mort totale est bien au delà de la mort de l'individu. La mort est un décrétement ; elle est pseudo-asymptotique à l'axe de part et d'autre duquel s'amortissent les oscillations de la vie.

La vie de l'individu, animal ou végétal, prend naissance dans le déséquilibre de deux énergies ou de deux rythmes, d'où lui vient son rythme propre, cause de sa croissance, de son développement, de sa perfectibilité.

Tout ce qui vit, bruit. Les vies partielles dont est faite notre vie totale se déroulent en pulsations successives qui ébranlent l'atmosphère où se manifeste leur activité : le cœur bruit, le muscle contracté bruit, la sève qui circule dans les canaux de la plante bruit, et le son est l'accompagnement obligatoire de la vie organique et atmosphérique, alors qu'il n'apparaît pas dans la vie inorganique se déroulant au sein du seul éther.

Le rythme ondulatoire est fonction de la masse vibrante, et plus cette masse est faible, plus la fréquence peut s'élever. L'insecte dispose de longueurs d'onde auxquelles ne pourra jamais prétendre le taureau et là est la raison profonde de l'infériorité du mammoth vis-à-vis de la bactérie ; l'accélération du rythme accroît l'adaptabilité et la voix du ténor a plus de souplesse et de modulations que celle de la basse.

Mais cette adaptabilité est à l'inverse de la longévité. La vitesse du rythme marque le terme de la vie, et celle-ci, toutes choses égales d'ailleurs, se prolonge par des états de repos périodiquement et régulièrement renouvelés. La longévité ne s'accommode pas de l'intensité

de vie ; il lui faut le sommeil ou la léthargie pour réparer cette fatigue qui entraîne le vieillissement prématuré et se marque par une sorte de minéralisation des tissus.

Les effets naturels concordent tous vers les mêmes fins. Plus l'être se développe en taille, plus la nécessité d'une armature se fait impérieuse pour le soutien de son édifice : chez le végétal, la lignine pénètre la cellulose et chez l'animal le cartilage se calcifie ; ainsi le veut le développement normal de l'être. Mais cette ossification, qui fixe la charpente et arrête la croissance, détermine aussi, comme l'a remarqué BUFFON, le terme maximum d'une existence. Les incrustations, les scléroses nées de la fatigue viennent accélérer cette fixation et avancent l'heure de la mort.

Tout ce qui entrave le rythme, tout ce qui éteint la pulsation comme on étouffe un son, tout cela — et non la seule solidification — conduit l'être vers sa dégénérescence, cet avant-coureur de la disparition. L'animal et la plante s'entretiennent dans la lutte et la souffrance ; les climats trop égaux comme les terrains trop fertiles sont, à la longue, une cause d'abâtardissement ; la plante de serre et l'animal prisonnier, la graine sélectionnée et le pur sang, tous ces êtres sont délicats, tous se débilitent, tous descendent vers une vie ralentie. Et c'est ainsi que s'éteignent des individus, des races et des peuples, victimes de l'évolution qui les mène vers l'amortissement de leur rythme.

Le rythme est inséparable du temps. Chaque cellule a sa vie propre et sa fonction, comme l'individu dans une société bien organisée. Chacune d'elles avait, en substance, toutes les possibilités ; mais elle s'est adaptée, elle s'est spécialisée, elle s'est restreinte à un seul travail pour le mieux accomplir et atteindre le maximum de production avec le minimum des moyens mis en œuvre. Avec le temps, chaque cellule pourrait se réadapter à

de nouvelles fonctions. Mais plus celles-ci sont spéciales, plus est long le temps exigé par une nouvelle éducation. Chez certaines plantes comme chez les animaux très inférieurs, la scissiparité peut être un moyen de reproduction, car la réadaptation peut s'accomplir dans un temps assez court, et suffisant à ce que se maintienne une vie faiblement organisée.

Il en va tout autrement chez l'animal supérieur où la complexité de l'organisation s'établit seulement à la suite d'un cycle préparatoire et de longue durée. L'accident qui vient rompre l'équilibre instable de son rythme composite et l'harmonie des cadences pulsatoires qui constitue sa vie, cet accident est mortel. Les individus sont à la fois plus puissants et plus vulnérables que les cellules dont ils sont la sommation et les états civilisés sont dominés par la même règle.

Aussi, quelle leçon d'humilité pouvons-nous puiser dans la contemplation du travail de la nature ! Plus nous en scrutons les détails et plus nous sommes saisis d'admiration pour ce labeur si merveilleusement discipliné.

Équation vitale

La courbe de la secousse musculaire est, croyons-nous, représentative de la plus importante des équations vitales. Cette équation, qui peut dans sa forme la plus simple s'écrire :

$$y = A (1 - e^{-Bt})$$

exprime la marche d'un grand nombre de phénomènes naturels, et indique, en fonction du temps, l'amplitude de tous ceux dans lesquels une période explosive est suivie d'une période de détente.

C'est la courbe du troisième temps dans un moteur à explosions fonctionnant selon le cycle de BEAU DE ROCHAS, c'est aussi celle des pressions dans l'intérieur

d'une bouche à feu en fonction des déplacements du projectile ; c'est encore celle des intensités de courant dans la décharge conductive d'un condensateur aussi bien que celle des émissions du « corps noir », de la sensibilité de l'œil et des réactions électriques de la plante au choc d'excitation...

Il ne faut pas voir là que l'effet d'un simple hasard : tous ces phénomènes ont la même représentation graphique, car ils appartiennent tous, mécaniquement, au même ordre de faits.

Conclusion

A mesure que la science progresse, notre esprit doit s'habituer à considérer des nombres de plus en plus élevés, aussi bien vers l'ordre des infiniment grands que vers celui des infiniment petits. C'est une foi nouvelle qui s'offre à nous, car notre esprit n'est appelé à saisir que des choses comprises entre des limites très étroites. Si l'éducation nous apprend à élargir ces limites, il n'en reste pas moins que le « très grand » aussi bien que le « très petit » sont en dehors de nos appréciations immédiates.

Chaque fois que nous apprenons à nous élever plus haut, il nous faut aussi apprendre à descendre plus bas.

Et il est curieux de remarquer qu'il existe une sorte de constante dans le produit des nombres astronomiques, toujours plus élevés, et ceux de la physique moléculaire, toujours plus infimes. Si ces nombres représentent des réalités, nous ne pouvons cependant pas affirmer qu'elles sont vraiment tangibles pour notre cerveau. Un jour viendra sans doute où cessera cet accroissement des valeurs, où se révéleront à nous les nombres limites, ceux au delà desquels il n'y a plus de vie possible, plus de monde organisé qui soit concevable.

Les progrès récents de la physique nous font entre-

voir que le monde, sans doute sorti de l'éther, y retourne invinciblement et que la vie marque seulement un épisode entre ces deux équilibres. Si la mécanique peut, à la rigueur, nous faire comprendre la seconde partie du voyage, c'est sans doute parce que nous assistons à ce retour et que nous en sommes les participants. Mais la première partie, mais le déclenchement qui a rompu le premier état d'équilibre, aucune théorie n'est susceptible d'en donner à notre esprit une intuition, même la plus vague.

L'infini et le continu sont des symboles métaphysiques. Le néant vient se ranger à côté d'eux. Car rien n'existe pour nous en dehors de la comparaison : tout seul, emplissant l'univers, l'éther n'est plus rien ; il figure le néant.

Toutes nos analyses, toutes nos synthèses viennent toujours se heurter à une limite qu'elles n'arrivent pas à franchir. Peut-être en devons-nous accuser la parole, merveilleux système qui permet de classer les concepts et, par voie d'explication, de réduire à d'autres plus simples ceux qui sont trop compliqués. Mais ce système n'est-il pas comme les autres systèmes et ne comporte-t-il pas les inconvénients de ses avantages ?

La parole est une sorte de crible dressé par l'homme entre les idées et son cerveau : seules, peuvent passer, au travers de ce crible, les idées plus menues qu'un certain gabarit ; les autres se heurtent au grillage et retombent. Il existe encore de nombreux concepts qui ne se peuvent clairement réduire à des mots, quoique nous en saisissons obscurément le sens. Devant eux, la parole qui a tant fait pour faciliter certains progrès dans nos connaissances, se montre impuissante. Un jour viendra peut-être où nous pourrons adapter nos paroles à ces concepts. Mais, en l'attendant, et pressés que nous sommes, nous nous contentons d'adapter les concepts aux paroles, et c'est de là que naissent tant d'erreurs.

En nous apportant des jugements tout faits, la parole fait parfois, du savant, l'inférieur de l'illettré.

Instrument d'un maniement facile, la parole s'est répandue dans toute l'humanité, à la fois pour le plus grand profit et pour le plus grand tort de celle-ci. Elle a endormi certaines facultés naturelles qui se sont atrophiées, chez l'homme, faute de lui être absolument nécessaires et de lui servir couramment. Sans que nous le sachions, ces facultés existent sans doute encore chez certains animaux qui possèdent ainsi des sens qui nous font défaut et nous aideraient, peut-être, à mieux comprendre la nature.

« Il n'y a nulle différence, a dit LAMARCK, dans les lois physiques par lesquelles tous les corps qui existent se trouvent régis, mais il s'en trouve une considérable dans les circonstances où les lois agissent. »

Cette différence, croyons-nous, réside surtout dans un fait : nos machines artificielles sont établies avec des matériaux simples, à peu près constants dans leurs propriétés physiques et chimiques, qui sont nettes et caractérisées. Les phénomènes auxquels l'homme fait appel pour faire marcher ces machines sont, eux-mêmes, des phénomènes francs, bien affirmés, aisément mesurables.

La machine animée, tout au contraire, est faite de demi-mesures : le conducteur y est isolant et l'isolant y est conducteur, les températures n'y oscillent que de quelques degrés, le solide rejoint le liquide et les réactions chimiques — toujours complexes et entre corps qui se refusent quelquefois à l'analyse — sont souvent prêtes à s'inverser. Il se présente là toute une gamme de combinaisons nouvelles conditionnées par les lois ordinaires de la mécanique, mais qui nous déconcertent, l'imprévu du résultat masquant davantage le jeu des actions primordiales.

Non, rien n'est aussi compliqué qu'il n'apparaît quelquefois dans les enseignements qu'on nous donne. Au prix d'un travail accru, il faut réduire les difficultés en éléments plus immédiatement accessibles. Nous devons, dans les recherches biologiques, mettre l'esprit le plus simple au service de cette cause la plus compliquée, et n'oublier jamais que ce sont toujours les mêmes propriétés fondamentales qui agissent, toujours les mêmes règles de fonctionnement qui s'appliquent, quels que soient les mécanismes, vivants ou artificiels, mis en jeu.

Au surplus, l'étude de l'anatomie comparée ne fait-elle pas éclater à tout instant, devant nos yeux, cette règle inflexible que, d'un bout à l'autre de l'échelle animale, la même fonction est toujours accomplie par les mêmes organes, qui restent semblables quand ils ne sont identiques ? Si la nature est avare dans ses moyens, elle est plus simpliste encore dans ses procédés ; jamais elle ne change l'équation par laquelle s'exprime un phénomène ; son activité se borne seulement à varier les coefficients ou les constantes, annulant un plus grand nombre des uns ou des autres à mesure qu'elle nous rapproche davantage des êtres inférieurs. Les apparences se modifient à l'infini, mais les lois demeurent inflexibles. Et ceci doit augmenter nos espoirs de les pouvoir identifier.

L'homme naît avec l'esprit de parti. Ainsi le voulait autrefois le sentiment de sa sécurité. « Le malheur est, a dit R. BARON, qu'un homme est toujours de son parti avant d'être de son opinion. »

Spiritualistes et matérialistes, vitalistes et mécanistes sont peut-être moins éloignés dans leurs doctrines qu'on ne le pourrait croire dans un examen rapide de leurs théories respectives. Les progrès actuels de la science font que ces théories adverses s'en vont, d'un mouve-

ment accéléré, l'une vers l'autre et commencent même à se mutuellement pénétrer.

La théorie purement matérialiste n'est qu'une croyance ; elle n'a pas d'existence réelle : toujours elle s'arrête devant un obstacle à partir duquel, inconsciemment ou non, elle devient purement spiritualiste. Et les doctrines spiritualistes abandonnent chaque jour quelques faits ou quelques groupes de faits aux explications d'ordre purement mécanique. Si le spirituel est derrière les horizons de l'une, un émiettement superficiel, mais continu, de la substance de l'autre les obligera bien un jour à se rejoindre. Ainsi s'amortiront ces oscillations qu'entretiennent, de part et d'autre de l'axe de la science absolue, de la science fixée, les controverses actuelles. Et quand la science sera fixée, pourra-t-elle encore prétendre au nom de science ?... Il serait possible que cette révélation nous laissât stupides, après nous avoir conduits vers les confins du néant.

Programme

Notre exposé commence par la dynamique musculaire. Dans nos intentions, cet ordre est logique : nous avons débuté par le muscle, parce que tous les phénomènes qui s'y produisent sont, à une échelle différente et fortement grossis, les mêmes que ceux produits par d'autres organes.

La dynamique musculaire n'est donc, dans le dessein de l'auteur, qu'une manière d'introduction destinée à entraîner le lecteur, par degrés successifs, vers d'autres problèmes, apparemment plus mystérieux, de la vie consciente ou non consciente. Cette sorte d'initiation progressive m'a semblé nécessaire, en raison de l'insuccès qui aurait, avec certitude, accueilli l'abord, de plain-pied, de théories plus surprenantes que celle se rapportant au muscle.

En définitive, cette théorie n'a été mise au jour que pour tâcher de lui faire joindre la personne, inconnue de l'auteur, susceptible d'y prendre quelque intérêt et de la développer plus avant. Que cette personne, en retour, veuille bien me faire connaître les fruits de son travail, et je resterai son obligé.

Dans une seconde partie de cet ouvrage, nous montrerons que le fonctionnement électrique du nerf n'est, dans son principe, aucunement différent de celui du muscle et que les phénomènes pulsatoires, ou cycloïdaux, constituent la modalité essentielle des manifestations vitales. Dans cette même partie, nous établirons la théorie électrique du cil vibratile, et nous montrerons que les sensations et la motilité sont, électriquement, deux phénomènes antagonistes dont l'origine remonte à la réversibilité de fonctionnement du cil vibratile.

Ayant constaté que les pulsations ne sont qu'une classe spéciale des vibrations que la physique a décelées, depuis le son jusqu'aux rayons γ , nous en déduirons qu'elles engendrent des ondes et que, dans les champs avoisinant le lieu de leurs manifestations, il se produit entre l'onde fondamentale, ou ses harmoniques, et les ondes voisines, des interférences et des résonances expliquant non seulement les phénomènes déjà constatés, mais d'autres encore, qu'on avait crus contestables.

Ainsi, nous pourrons nous hausser, après avoir analysé l'enregistrement électrostatique des impressions périphériques transmises par l'intermédiaire des sens, jusqu'à comprendre ce que peuvent être la sensation, la mémoire et la conscience, cette dernière étant conditionnée par ce cosinus φ , familier à tous les électriciens, et qui tient au décalage des origines de deux phénomènes pendulaires.

Nous montrerons, enfin, comment la vie cellulaire reste sous la dépendance étroite de lois électriques

simples, nous permettant de répéter dans notre conclusion cette proposition déjà formulée par nous : aucun des mécanismes mis en jeu par l'animal, et constituant l'essentiel de sa vie, aucun de ces mécanismes n'existe sans avoir son identique — et non pas [seulement son semblable — dans ceux que l'homme a conçus et réalisés depuis un siècle et demi. Avec des milliers, peut-être des millions d'années de retard, l'ingénieur n'est maintenant occupé qu'à refaire de son côté le travail déjà fait par la nature.

SUR LES CONDENSATEURS ÉLECTRIQUES

Les condensateurs, après être longtemps restés de simples appareils de démonstration à l'usage des laboratoires de physique, trouvent aujourd'hui des applications de plus en plus nombreuses et importantes dans les diverses branches de l'électricité industrielle. Un des objets du présent ouvrage est de démontrer que les phénomènes de condensation, ou de capacité inductive, jouent dans le fonctionnement de la machine animale un rôle de toute première importance.

La théorie du condensateur ordinaire, c'est-à-dire du dispositif dans lequel le diélectrique séparant les deux armatures peut être pratiquement considéré comme un isolant parfait, est trop connue pour qu'il soit nécessaire de le rappeler ici.

Mais l'étude des condensateurs industriels et, en particulier, celle des *capacités* présentées par les câbles de télégraphie sous-marine, ont conduit à la constatation d'un certain nombre de faits qui dépendent d'une théorie générale autrefois exposée par MAXWELL et dont certains cas particuliers analysés par A. HESS présentent un très haut intérêt dès qu'il s'agit de pénétrer dans le domaine des applications pratiques. Ceci nous oblige, malgré l'aridité d'un tel sujet, à consacrer quelques développements à la question spéciale des *résistances d'isolement*, résistances auxquelles il est impossible d'appliquer purement et simplement la loi d'OHM.

Diélectriques et champs électriques

Les principales constatations faites sur les diélectriques placés dans des champs électriques peuvent se résumer ainsi :

1° Tous les diélectriques formés d'une substance non rigoureusement homogène présentent une perméabilité électrique plus ou moins accentuée, de telle sorte qu'un courant, donnant lieu à une perte de charge, s'établit entre les deux armatures du condensateur. Le simple fait de juxtaposer deux diélectriques homogènes suffit à faire apparaître nettement la perméabilité.

2° La présence d'humidité, à la surface ou dans la substance du diélectrique, est le principal facteur de la perméabilité d'un diélectrique.

3° Les pertes sont dues, non seulement à une action conductive de l'isolant, mais aussi, et principalement, à une action inductive des particules qui rendent la masse hétérogène.

4° La capacité inductive spécifique varie avec la température. Le plus généralement, elle diminue lorsque la température s'élève. L'influence de la température est d'autant plus grande que l'humidification est plus forte. Avec les groupements complexes de matières constituant l'isolement des câbles industriels (papiers, résine, huiles), les pertes sous tensions périodiques passent par un minimum très accusé, au voisinage de 30°, où elles sont sensiblement la moitié des pertes à 12° ou à 55°.

5° Pour une même différence de potentiel, la perméabilité du diélectrique est plus élevée lorsqu'on applique sur les armatures des courants périodiques et croît avec la fréquence. Cette perméabilité est une fonction parabolique de la fréquence, et varie très rapidement pour les basses fréquences, c'est-à-dire celles qui sont inférieures à 100 par seconde.

6° Dans la capacité totale d'un condensateur, une part est constante ; une autre part est variable, et c'est celle qui dépend de la température et de la fréquence.

7° La perte d'énergie consécutive à l'augmentation de fréquence est attribuable à un effet d'hystérésis analogue à celui qui se produit avec les électro-aimants.

Nous aurons à plusieurs reprises l'occasion de rappeler ces différentes lois lorsque nous étudierons ultérieurement l'électro-dynamique musculaire.

CARACTÉRISTIQUES DU CONDENSATEUR A DIÉLECTRIQUE PERMÉABLE ET ÉLASTIQUE

Théorie générale

De même qu'on établit pour chaque machine motrice une courbe *caractéristique* de son fonctionnement, de même nous pouvons rechercher la caractéristique du condensateur-moteur, c'est-à-dire de celui dont les deux armatures, non maintenues à une position fixe, sont libres de se rapprocher en vertu de l'attraction que la charge électrique leur fait exercer mutuellement l'une sur l'autre. Pour que ce problème soit traité dans une plus grande généralité, nous supposerons en même temps que le diélectrique présente une certaine perméabilité.

Soit (fig. 1) une masse de substance S au sein de laquelle sont noyées des particules d'une autre substance S'. Si S constitue le diélectrique proprement dit et que S' en soit « l'impureté », nous sommes amenés à considérer la résistance électrique de S comme étant d'un ordre infiniment supérieur à celle de S'. Autrement dit, la substance S possède un pouvoir inducteur spécifique déterminé et une résistance ohmique pratiquement infinie ; au contraire, les particules S', pour-

vues d'une certaine capacité inductive spécifique, ont une résistance ohmique faible.

Si nous découpons dans notre lame isolante un

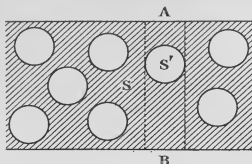


FIG. 1. — Diélectrique hétérogène.

cylindre tel que AB, perpendiculaire aux deux plans qui la limitent, ce cylindre présentera des couches alternativement isolantes et conductrices (ou, plus exactement, tantôt plus isolantes que conductrices et tantôt plus conductrices qu'isolantes) que nous pouvons, théoriquement, réduire à deux seuls éléments différents. Ce système est analogue au couplage en série de deux condensateurs, l'un de capacité C et de résistance intérieure r , l'autre de capacité C' et de résistance intérieure r' . Pour la commodité des explications, nous pouvons figurer la seconde de ces résistances par un shunt.

Montons un tel dispositif aux bornes d'une pile de force électromotrice E , dans un circuit de résistance totale R (fig. 2). Les différences de potentiel aux bornes de chacun des condensateurs de capacités C et C' étant respectivement V et V' , nous avons :

$$V + V' = E - RI \quad (1)$$

La charge du premier condensateur s'opère selon la loi :

$$CdV = Idt \quad (2)$$

Celle du second est modifiée par la présence de la résistance ohmique r' et s'écrit :

$$C'dV' = I dt - \frac{V'}{r'} dt \quad (3)$$

De l'ensemble de ces trois expressions, nous déduisons l'équation différentielle :

$$RC' \frac{d^2 V'}{dt^2} + \left(1 + \frac{R}{r'} + \frac{C'}{C}\right) \frac{dV'}{dt} + \frac{V'}{r'C} = 0 \quad (4)$$

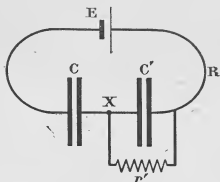


FIG. 2. — Condensateur shunté.

La solution générale de cette équation est de la forme :

$$V' = A_1 e^{a_1 t} + A_2 e^{a_2 t}$$

dans laquelle a_1 et a_2 sont les racines de l'équation du second degré :

$$RC'a^2 + \left(1 + \frac{R}{r'} + \frac{C'}{C}\right)a + \frac{1}{r'C} = 0$$

ou :

$$a = \frac{-\left(1 + \frac{R}{r'} + \frac{C'}{C}\right) \pm \sqrt{\left(1 + \frac{R}{r'} + \frac{C'}{C}\right)^2 - 4 \frac{R}{r'} \frac{C'}{C}}}{2 RC'} \quad (5)$$

Lorsque $t = 0$, les condensateurs étant supposés non chargés, nous avons $V' = 0$. Donc $A_1 = -A_2$.

De (3) nous tirons une expression de l'intensité de charge en fonction du temps :

$$I = C'A_1 (a_1 e^{a_1 t} - a_2 e^{a_2 t}) + \frac{A_1}{r'} (e^{a_1 t} - e^{a_2 t})$$

La solution particulière $I = \frac{E}{R}$ pour $t = 0$ nous permet de déterminer A_1

$$\frac{E}{R} = C'A_1 (a_1 - a_2) \quad \text{ou} \quad A_1 = \frac{E}{RC' (a_1 - a_2)}$$

de sorte que nous pouvons écrire :

$$I = \frac{E}{R (a_1 - a_2)} \left[\left(a_1 + \frac{1}{C'r'} \right) e^{a_1 t} - \left(a_2 + \frac{1}{C'r'} \right) e^{a_2 t} \right] \quad (6)$$

$$V = \frac{E}{RC' (a_1 - a_2)} (e^{a_1 t} - e^{a_2 t}) \quad (7)$$

$$V = E \left\{ 1 - \frac{1}{a_1 - a_2} \left[\left(a_1 + \frac{1}{C'r'} + \frac{1}{C'R} \right) e^{a_1 t} - \left(a_2 + \frac{1}{C'r'} + \frac{1}{C'R} \right) e^{a_2 t} \right] \right\} \quad (8)$$

Or, a_1 et a_2 sont des termes toujours négatifs, l'expression sous la racine (5) étant toujours plus petite que celle placée entre parenthèses. Les fonctions e^{at} diminuent donc avec le temps.

Les courbes de la figure 3 représentent l'allure générale de V , V' et $V + V'$.

Nous voyons immédiatement combien la courbe de V' présente d'intérêt : la différence de potentiel du condensateur C' commence par s'élever, passe par un maximum, puis décroît lentement. En d'autres termes, *à partir d'un certain moment, la perte de la charge à travers la résistance intérieure r' est supérieure à l'apport fourni par la source.*

Le maximum est donné par :

$$\frac{dV'}{dt} = \frac{E}{RC' (a_1 - a_2)} (a_1 e^{a_1 t} - a_2 e^{a_2 t}) = 0,$$

c'est-à-dire pour

$$t = \frac{1}{a_1 - a_2} \log_e \frac{a_2}{a_1}$$

ce qui nous permet de calculer, si besoin est, le maximum de V' .

Remarquons également que la courbe de V' présente un point d'inflexion pour $\frac{d^2V'}{dt^2} = 0$, c'est-à-dire lorsque

$$t = \frac{1}{a_1 - a_2} 2 \log_e \frac{a_2}{a_1}.$$

A partir de ce moment, la courbe tend à devenir asymptotique à l'axe des abscisses.

La courbe V croît, mais évidemment moins vite que

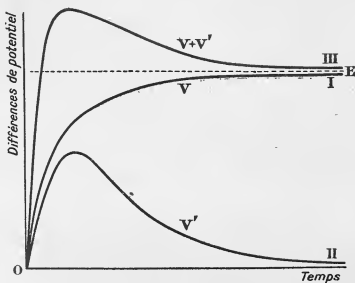


FIG. 3. — Différences de potentiel en fonction des temps.

I. Condensateur ordinaire;

II. Condensateur shunté; III. Couplage de condensateurs.

si ce condensateur était seul en circuit. La somme $V + V'$, ou différence de potentiel de l'ensemble du système, se comporte différemment selon l'ordre des grandeurs respectives de $V + V'$, ce que nous avons traduit graphiquement, à titre d'exemples, sur les

figures 3 et 4, où l'on remarquera cependant que la loi des variations reste toujours semblable à elle-même.

La courbe de l'intensité varie en sens contraire, avec une allure semblable à celle de $V + V'$. En effet, en vertu de la relation $I = \frac{E - (V + V')}{R}$, il suffit de renverser la courbe $V + V'$ pour obtenir, à un facteur

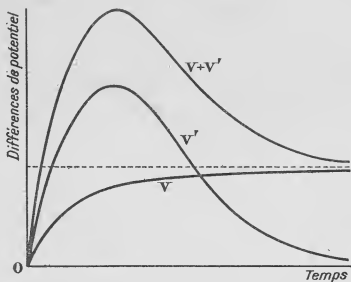


FIG. 4. — Autre aspect des courbes de la fig. 3.

constant près, la courbe de l'intensité de charge I en fonction du temps. (Fig. 5.)

Si, dans le but de généraliser davantage, nous donnons à la résistance r du condensateur C une certaine conductibilité, de valeur finie par rapport à celle de r' , cela revient à shunter également le condensateur C . Nous introduirons alors dans l'expression de I un terme variable, croissant avec le temps, et un autre terme constant, déterminant l'asymptote de l'intensité et sa valeur finale, celle-ci étant entièrement due à la conductibilité. Cette généralisation n'est guère nécessaire, car les phénomènes ne s'en trouvent que très légèrement modifiés. Il est à remarquer que les résistances r et r'

varient avec la température, celle-ci étant elle-même fonction du temps d'application du courant. Il n'est pas nécessaire, toutefois, d'introduire ici cette variable dont l'action ne se fait sentir que sur les grandeurs absolues des charges, — qu'elles diminuent, — et des intensités de courant, — qu'elles augmentent, — sans modifier en rien l'allure des phénomènes en jeu.

De même, on constaterait que si, au lieu de réduire

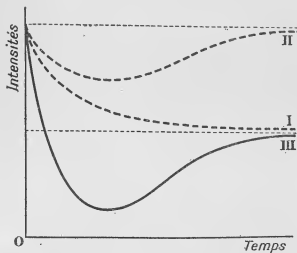


FIG. 5. — Intensités en fonction des temps.

à deux éléments les substances alternativement rencontrées dans le cylindre AB, on considérerait un ensemble de n éléments, on arriverait à l'établissement d'une équation différentielle analogue à l'équation (4) et dans laquelle les constantes, seules, se trouveraient modifiées. Le calcul deviendrait plus compliqué, mais la courbe du courant de charge conserverait la même allure générale.

Capacité apparente

Nous avons indiqué précédemment qu'il suffisait d'inverser les courbes des différences de potentiel en fonction des temps pour obtenir, à un facteur constant près, les courbes des intensités de charge aux différents temps de l'expérience.

Durant la charge, *tout se passe comme si la capacité du système augmentait au fur et à mesure qu'il absorbe de l'électricité*. Le rapport de la quantité d'électricité mise en jeu à la différence de potentiel à chaque instant constitue ce que l'on peut appeler la *capacité apparente* du système, qui s'exprime ainsi :

$$\gamma = \frac{Q}{V + V'}$$

Cette quantité est loin d'être une constante, et elle varie avec le temps. Aussi devons-nous écrire :

$$dQ = \gamma d(V + V') + (V + V') d\gamma.$$

Au début, $\gamma = \frac{0}{0}$. Mais en levant cette indétermination, nous voyons que

$$\gamma = \frac{CC'}{C + C'}$$

Pendant toute la durée de la charge, γ augmente. La courbe de cette grandeur, qui n'est pas portée sur la fig. 6 est très sensiblement une droite, tout au moins pendant les premiers instants de l'expérience. Plus loin, la courbe fléchit et devient asymptotique à une horizontale correspondant à $\gamma = C$.

En réalité, et comme nous sommes amenés à supposer que le diélectrique est élastique, les armatures obéissent au déplacement que leur communiquent les forces électriques en présence : l'énergie potentielle du système tend vers un minimum, alors que la capacité du système tend vers un maximum.

Nous aurons plus loin l'occasion de vérifier l'importance de la remarque qui vient d'être exposée.

Influence de la température

On sait que les isolants présentent cette propriété

que leur résistance électrique diminue au fur et à mesure que leur température s'élève. Donc, au bout du même temps, les intensités de charge sont d'autant plus fortes que la température est plus élevée.

Si, dans les équations précédentes, nous faisons diminuer r' , les ordonnées représentant les intensités croissent. Comme les variations des capacités c et c' sont réellement infimes par rapport à celles de r' , il y a peu d'utilité à les faire intervenir dans les calculs. Il est toutefois intéressant de remarquer que les courbes obtenues théoriquement sont superposables à celles qui ont été obtenues expérimentalement, aussi bien dans les expériences faites sur l'isolement des câbles sous-marins que dans celles faites en physiologie et que nous relaterons ultérieurement.

Absorption et charges résiduelles

La théorie précédente explique très simplement les phénomènes de décharges résiduelles.

Si, dans un but de simplification, nous conservons au circuit de décharge la résistance totale R que présentait le circuit de charge, nous pouvons poser les trois équations :

$$V + V' = RI \quad (1 \text{ bis})$$

$$- C dV = I dt \quad (2 \text{ bis})$$

$$- C' dV' = I dt + \frac{V'}{r'} dt \quad (3 \text{ bis})$$

qui nous donnent :

$$V' = A_3 e^{a_1 t} + A_4 e^{a_2 t} \quad (4 \text{ bis})$$

où a_1 et a_2 sont les deux constantes fournies par la précédente relation (5). Par contre, A_3 et A_4 diffèrent respectivement de A_1 et A_2 si nous avons arrêté l'opération de charge avant qu'elle ne soit complète.

$$I = -C' (a_1 A_3 e^{a_1 t} + a_2 A_4 e^{a_2 t}) - \frac{I}{r'} (A_3 e^{a_1 t} + A_4 e^{a_2 t}) \quad (5 \text{ bis})$$

Or, pour $t = 0$, nous avons :

$$V'_0 = A_3 + A_4$$

$$I_0 = \frac{V_0 + V'_0}{R} = -C'(a_1 A_3 + a_2 A_4) - \frac{V'_0}{r'} \quad (6 \text{ bis})$$

d'où :

$$A_3 = - \frac{V_0 + V'_0 \left(1 + RC'a_2 + \frac{R}{r'} \right)}{RC'(a_1 - a_2)} \quad (7 \text{ bis})$$

$$A_4 = \frac{V_0 + V'_0 \left(1 + RC'a_1 + \frac{R}{r'} \right)}{RC'(a_1 - a_2)} \quad (8 \text{ bis})$$

Dans la partie centrale de la fig. 6 nous avons repré-

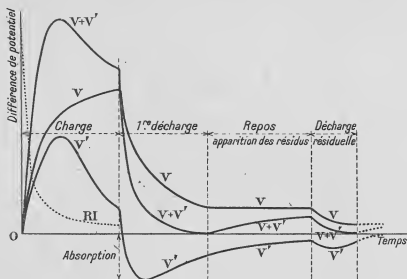


FIG. 6. — Valeurs des différences de potentiel : 1° pendant la charge; 2° pendant une première décharge; 3° pendant un temps de repos; 4° pendant une seconde décharge.

senté les variations de V , V' et $V + V'$ pendant la décharge. On remarquera que, à un facteur près, I coïncide avec $V + V'$. V' passe par les mêmes phases que durant la charge, mais en sens opposé. Autrement dit, la différence de potentiel aux bornes du conden-

sateur C' diminue, devient nulle à un certain moment, et prend ensuite des valeurs négatives. En valeur absolue, on doit donc la retrancher de la tension V aux bornes de C , de sorte que la somme algébrique $V + V'$ est inférieure à V et tombe rapidement à des valeurs très faibles.

La quantité d'électricité que renferme le système est $Q = CV$. Elle varie donc, comme pendant la charge, proportionnellement à V . En d'autres termes, quand le système ne se charge que lentement, *il est également très long à abandonner sa charge* ; la capacité apparente γ augmente dans des proportions considérables et tend à s'opposer de plus en plus à la déperdition de l'électricité dans le circuit extérieur. Ce phénomène a été vérifié sur les câbles isolés à la gutta, qui ne sont pas déchargés complètement, même après une mise en court-circuit prolongée des deux armatures.

Si, maintenant, nous rompons le circuit et laissons le condensateur isolé, puis fermons à nouveau le circuit, nous constaterons le phénomène bien connu de la « décharge résiduelle ». La théorie rend parfaitement compte de ce fait, que nous avons représenté graphiquement sur la troisième partie de la figure 6. Constatons d'abord que la différence de potentiel V aux bornes de C doit se traduire par une droite ; la résistance r étant pratiquement infinie, il n'y a, en effet, aucun motif à variation de la différence de potentiel. Par contre, la charge de C' se dissipe dans sa résistance intérieure r' ; la tension V' diminue donc, en valeur absolue, d'après la loi :

$$V' = V_0' e^{-\frac{t}{C'r'}}$$

Cette courbe de forme exponentielle est placée en dessous des abscisses, de sorte que la somme algébrique $V + V'$ *augmente*. Ce qui revient à dire : *la diffé-*

rence de potentiel entre les deux faces de la lame diélectrique augmente pendant le repos.

Il est, dès lors, tout naturel que, si l'on referme le circuit, on obtienne une nouvelle décharge, dite *résiduelle*, qui s'effectue d'après la même loi générale que la première. Une nouvelle période d'isolement fera apparaître un nouveau résidu, et ceci un grand nombre de fois.

Théorie simplifiée

Si l'on ferme le circuit d'une pile sur un condensateur dont le diélectrique possède une résistance ohmique intérieure ρ , l'intensité I du courant de charge n'atteint pas immédiatement sa valeur normale ; en effet, tandis qu'une portion du courant traverse directement le diélectrique, une autre est destinée à satisfaire, à chaque instant dt à l'accroissement de charge du condensateur.

Soient : V la force électromotrice de la pile,

V_t la différence de potentiel entre armatures
au temps t ,

R la résistance intérieure de la pile,

C la capacité du condensateur ;

en exprimant que la quantité d'électricité qui traverse la pile dans un temps dt est égale à celle qui traverse le diélectrique, augmentée de celle qui satisfait à l'accroissement de charge, on a :

$$\frac{V - V_t}{R} dt = C dV_t + \frac{V_t}{\rho} dt$$

D'où :

$$C \frac{dV_t}{dt} = \frac{V - V_t}{R} - \frac{V_t}{\rho}$$

équation différentielle qui, intégrée, donne :

$$V_t = V \frac{\rho}{\rho + R} \left(1 - e^{-t \frac{\rho + R}{CR\rho}} \right) \quad (A)$$

Dans cette relation, la résistance du diélectrique est supposée constante. Or, il n'en est pas ainsi avec les matières organiques, dont la résistance ohmique est fonction du temps d'électrification. Si nous supposons, — ce qui est le cas le plus général, — que cette résistance diminue avec le temps, la fonction la plus simple pouvant représenter ce phénomène sera la loi hyperbolique

$$\rho_t = \frac{\rho}{t}$$

où ρ_t est la résistance au bout du temps t d'électrification et ρ la résistance initiale. En reportant cette valeur dans l'expression A, on est conduit à une fonction logarithmique de la forme :

$$V_t = V \frac{1}{1 + \alpha t} \left(1 - e^{-\frac{t(1 + \alpha t)}{CR^2}} \right) \quad (B)$$

où α est un facteur dépendant des conditions du circuit.

La discussion de cette fonction nous conduit à l'établissement d'une courbe dont l'allure générale est identique à celle de $V + V'$ sur la fig. 3. La différence de potentiel entre armatures, et par suite la charge du condensateur, part de zéro, croît, passe par un maximum et ensuite décroît, pour revenir asymptotiquement égale à zéro. Pour éviter de reproduire ici une longue suite de calculs assez laborieux, nous conserverons dans la suite de nos explications cette expression (B) qui peut être considérée comme suffisamment représentative de $V + V'$.

Élasticité du diélectrique

Par diélectrique élastique, nous entendons un isolant tel que, sous l'influence de la pression électrostatique qui s'exerce entre les deux armatures, celui-ci subit une déformation se traduisant par une diminu-

tion d'épaisseur, cette déformation disparaissant avec la cause qui la produit et qui est, en l'espèce la charge du condensateur ou, mieux, la différence de potentiel existant entre ses armatures.

Soit : l l'épaisseur de l'isolant ;

λ son raccourcissement absolu ;

Ω sa section ;

E son coefficient d'élasticité longitudinale ;

F_1 l'effort de compression.

Le rapport $\frac{\lambda}{l}$ représente le raccourcissement relatif, ou déformation unitaire du diélectrique. D'autre part, on sait que la relation liant ces diverses quantités est :

$$F = E_1 \Omega \frac{\lambda}{l}$$

Nous sommes conduits à admettre que la matière constituant l'isolant a un faible coefficient d'élasticité, du même ordre que celui des matières organiques et d'un ordre très nettement inférieur à celui des métaux.

L'élasticité du diélectrique permet à la pression électrostatique qui s'exerce entre les deux armatures de manifester, d'une façon sensible, ses effets : les deux armatures se rapprochent. Si le système est disposé de telle sorte que nous puissions éliminer toute composante due à la pesanteur, la pression électrostatique sera, à chaque instant, égale et directement opposée à la tension élastique du diélectrique. On pourra donc poser :

$$F = E_1 \Omega \frac{\lambda}{l} = \frac{V_t^2 \Omega}{8 \pi (l - \lambda)^2} \quad (C)$$

De cette expression, nous pourrions tirer la loi des variations de λ (raccourcissement absolu) ou de $\frac{\lambda}{l}$ (rac-

courcissement relatif) en fonction des variations de V_t , c'est-à-dire en remplaçant V_t par sa valeur, précédemment établie, en fonction du temps de charge du condensateur.

Mais la formation du diélectrique nous conduit à introduire, dans l'expression de V_t , deux modifications : l'une est relative à la résistance ohmique et la seconde à la capacité.

La résistance ohmique ρ du diélectrique varie avec λ . Si ρ_1 est la résistance par unité de longueur, on a

$$\rho_t = \rho_1 (l - \lambda)$$

ρ_t étant la valeur de ρ à l'instant t .

En posant $\frac{\lambda}{l} = m$, avec cette remarque que m est plus petit que 1, nous écrirons :

$$\rho_t = \rho_1 l (1 - m)$$

D'autre part :

$$C = \frac{\Omega}{4 \pi l (1 - m)}$$

la capacité étant en raison inverse de la distance qui sépare les armatures.

En reportant ces différentes valeurs dans l'expression simplifiée (B) que nous avons donnée de V_t , on peut poser :

$$V_t = V \frac{\rho_1 l (1 - m)}{\rho_1 l (1 - m) + R} \left[1 - e - 4 \pi t \frac{\rho_1 l (1 - m) + R}{\Omega R \rho_1} \right]$$

En substituant dans la relation (C) nous avons

$$8 \pi E_1 m = \frac{V^2 \rho_1^2}{[\rho_1 l (1 - m) + R]^2} \left[1 - e - 4 \pi t \frac{\rho_1 l (1 - m) + R}{\Omega R \rho_1} \right]^2$$

ou

$$[\rho_1 l (1 - m) + R] \sqrt{8 \pi E_1 m} = V \rho_1 \left[1 - e - 4 \pi t \frac{\rho_1 l (1 - m) + R}{\Omega R \rho_1} \right] \quad (D)$$

Nous pouvons laisser cette expression sous sa forme implicite. Il nous est inutile de recourir aux procédés ordinaires de discussion, ce qui, dans le cas présent, conduirait à des calculs sans grand intérêt. Nous nous contenterons de fixer très rapidement la forme de la courbe représentative de $m = f(t)$ par cette remarque qu'on a forcément $m < 1$. A un facteur près, la courbe suit les variations de V_t et se présente à nous avec une allure générale analogue.

Nous pouvons donc considérer que les courbes précédemment établies (fig. 3, 4 et 6) pour les différences de potentiel sont suffisamment représentatives des variations d'écart entre armatures du condensateur, en fonction du temps, lorsque nous les relions aux deux bornes d'une source d'électricité présentant une différence de potentiel E , ainsi que cela a été supposé au début de notre étude. Toutefois, nous nous réservons de revenir sur l'allure de la courbe au départ, allure qui peut être modifiée par l'inertie de la matière élastique du diélectrique.

Force portante d'un condensateur

On sait que la force portante d'un condensateur peut s'exprimer par une formule analogue à celle qui donne la force portante d'un aimant. L'une et l'autre s'établissent à partir des mêmes principes théoriques sur les forces newtoniennes. Si nous exprimons la valeur du champ par rapport à la charge électrique et cette dernière en fonction de la différence de potentiel entre armatures, nous aurons, en désignant par K la constante diélectrique et en reprenant les mêmes notations que précédemment, pour expression de la force portante théorique :

$$F = 0,442 K 10^{-6} \frac{V^2 \Omega}{a^2} \quad (G)$$

où F est exprimée en dynes si V (différence de potentiel entre armatures) est exprimée en volts, Ω (surface d'une armature) en centimètres carrés et a (distance entre armatures) en centimètres.

Remarquons que, si nous sommes dans une situation d'équilibre, c'est-à-dire dans le cas d'un poids soutenu à hauteur maintenue constante, il n'y a pas lieu de faire intervenir le travail de compression de la substance diélectrique. Dans ce cas, il suffit de donner à V sa valeur en fonction du temps de soulèvement, puis d'intégrer de t_0 à t_1 pour avoir l'expression du travail fourni, qui représente exactement la dépense d'énergie électrique nécessaire au maintien des armatures à un écartement fixe. Il va sans dire qu'en période variable, c'est-à-dire avec déplacement du poids soutenu, il sera nécessaire, pour être exact, de faire intervenir l'expression, positive ou négative selon le cas, du travail de compression ou de détente de la substance diélectrique. En établissant la relation (C), nous avons donné les indications nécessaires pour faire ce calcul.

La formule (G) peut être discutée de la même manière que nous avons discuté antérieurement les relations donnant les valeurs de V , V' et $V + V'$. Les courbes qui traduisent les variations de F ont identiquement les mêmes allures respectives. Pratiquement, c'est seulement leur maximum, exprimé par (G) dans laquelle on introduit, en place de V , la valeur maxima de V , qui est susceptible de nous intéresser.

Si nous introduisons des chiffres en place de lettres dans la formule (G), nous constatons que la force portante d'un condensateur industriel ordinaire, même sous une tension relativement élevée, a une valeur infime. Ainsi, elle sera de 4 grammes pour un appareil dont les armatures de 100 centimètres carrés chacune sont distantes de 1 millimètre et sous tension de 100 volts. Par contre, si nous réduisons à 1 volt la diffé-

rence de potentiel, à $0,1 \mu$ la distance entre armatures et évaluons à 5 la constante diélectrique, la force portante se chiffre aux environs de 1 kilogramme pour 50 centimètres carrés de section. Autrement dit, nous faisons cette constatation de la plus haute importance, que : *la puissance d'un tel dispositif devient réellement appréciable lorsque les masses électriques en présence agissent à des distances infimes l'une de l'autre.* Et c'est dans ce cas particulier que s'est placée la nature.

Ce phénomène, que la théorie explique avec la plus grande aisance, a été découvert expérimentalement par EDISON vers 1880 et trouvé à nouveau, en 1918, par JOHNSEN et RAHBK qui en ont fait une application pratique à la téléphonie.

Phénomènes calorifiques

Pendant la période de charge du condensateur, la quantité d'électricité fournie par la source se compose de deux parties :

- 1° Celle qui traverse directement le diélectrique et qui est due aux « fuites » de l'isolant ;
- 2° Celle qui satisfait à la charge.

La première est directement transformée en chaleur par effet Joule. Son expression simplifiée est

$$W_1 = JQ_1 = \int_0^t \frac{V_t^2}{\rho_t} dt$$

Q_1 étant la quantité de chaleur apparue et J l'équivalent mécanique de la calorie.

Quant aux forces électriques, elles ont fourni, par l'effet de la contraction du diélectrique, un travail qui est justement égal au travail de compression, c'est-à-dire à :

$$W = E_1 \Omega \frac{\lambda^2}{l}$$

Pendant la période de décharge, le travail de ces forces électriques est directement transformé en chaleur, par effet Joule, dans le diélectrique et le milieu ambiant. Son expression est :

$$W_2 = JQ_2 = \int_{t'}^t \frac{V_t^2}{\rho_t + R} dt,$$

Q_2 étant la quantité de chaleur dégagée, t et t' les instants correspondant respectivement au maximum de la courbe et à son retour à zéro.

Quant aux forces élastiques, leur travail de détente, — à une quantité près, qui est ici négligeable et qui représente le travail de l'inertie moléculaire de la substance diélectrique, — est égal et de signe contraire au travail de compression. Il reprend donc au milieu la quantité de chaleur qu'il y avait fait apparaître et qui a pour valeur

$$Q = \frac{W}{J} = \frac{E_1 \Omega \lambda^2}{Jl}$$

En additionnant algébriquement les quantités de chaleur dégagées, tant à la charge qu'à la décharge, on trouve :

$$Q_1 + Q_2 = \frac{1}{J} \left(\int_0^{t'} \frac{V_t^2}{\rho_t} dt + \int_t^{t'} \frac{V_t^2}{\rho_t + R} dt \right)$$

C'est là l'expression du travail fourni par l'appareil partant du repos, subissant une contraction suivie d'une détente qui le ramène à son état de repos initial. On voit ainsi que la chaleur totale dégagée pendant une secousse du condensateur est égale à la somme des chaleurs dégagées :

1° Par le passage direct d'une partie du courant de la source à travers le diélectrique, ce qui est un effet de sa résistance ohmique ;

2° Au travail d'annihilation des forces électriques mises en présence par la charge, travail qui se résout, lui aussi, en effet Joule.

Nous aurons à examiner ultérieurement, lors des applications pratiques que nous présenterons pour arriver à une connaissance approfondie des propriétés du dispositif condensateur-moteur, le cas plus général des phénomènes thermiques qui apparaissent lorsque l'appareil est astreint à fournir un travail mécanique extérieur.

Secousse du condensateur

Par analogie avec le langage de la physiologie, nous donnerons le nom de secousse du condensateur à la contraction, suivie de détente, du condensateur auquel on fournit une charge unique.

La secousse a donc deux caractéristiques essentielles : l'*amplitude* et la *durée*.

Deux causes principales peuvent agir sur l'amplitude :

1° L'addition d'un poids ou de toute autre force à la tension élastique du diélectrique, de telle sorte que l'on ait

$$F' = P + E_1 \Omega m$$

P étant le poids ajouté;

2° La durée du temps de charge.

En effet, l'amplitude est fonction du potentiel de charge qui est, lui-même, fonction du temps. Il suffit de se reporter aux relations précédemment établies pour s'en rendre immédiatement compte.

Il est à remarquer, d'autre part, que plus la résistance ohmique intérieure du diélectrique est faible, moins la première partie de la courbe monte vite et plus la seconde portion décroît rapidement, à condition, bien entendu, que la résistance du circuit extérieur soit d'un ordre comparable à celle de ρ .

Contraction statique du diélectrique

Il ressort immédiatement des théories précédentes

qu'un courant continu est incapable de maintenir constamment rapprochées, à une distance fixe, les deux armatures d'un condensateur à diélectrique perméable. Si nous reprenons la courbe représentative de $V + V'$ (fig. 3) et que nous la transposions sur la courbe des elongations correspondantes (fig. 7), nous nous aperce-

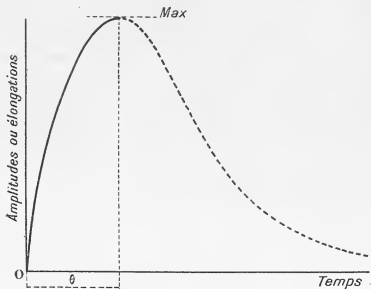


FIG. 7. — Amplitudes en fonction des temps.

vons que le maximum de la contraction est obtenu, non pas avec une charge unique, mais avec un courant de durée θ .

Si nous voulons maintenir les plateaux à un écartement fixe, nous devons couper au temps θ les connexions avec la source, puis les rétablir après un temps très faible et ainsi de suite, ce que nous avons traduit sur le graphique (fig. 8). Les plateaux seront donc animés d'un mouvement pendulaire autour d'une position moyenne, correspondant à la différence de potentiel moyenne V_m . En d'autres termes, la contraction statique, pour une même source d'alimentation et mêmes conditions de circuit, s'établira toujours sur une elongation plus petite que la secousse et s'en rapprochera

d'autant plus que la fréquence des émissions de courant sera plus élevée.

Une fréquence suffisante assurera une fusion intime des secousses et amènera l'état de contraction statique dénommé *tétanos* dans le langage physiologique.

Sur la figure 8, nous avons représenté en traits pleins

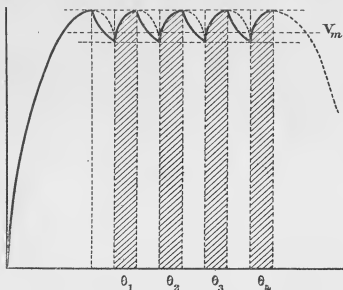


FIG. 8. — Maintien des armatures à un écartement moyen de valeur fixe.

les elongations théoriques. Dans la réalité, les différentes inerties qui entrent en jeu, depuis l'inertie moléculaire jusqu'à celle des équipages mobiles des appareils enregistreurs, tout concourt à donner aux diagrammes que l'on peut relever, dans les intervalles d'interruption de courant, l'allure indiquée en traits pointillés.

De même, les courants théoriquement interrompus et figurés en *a* (fig. 9) prendront la forme ondulée indiquée en *b*. Pour la commodité des explications qui suivront, nous les appellerons courants pulsatoires, ou *courants cycloïdaux*, malgré que leur forme ne puisse être aussi rigoureusement assimilée à celle de la cycloïde

que celle des courants alternatifs purs à la forme sinusoïdale. Nous négligeons, naturellement, dans cette première étude, la présence inévitable d'harmoniques pairs et impairs.

De tels courants jouissent de propriétés analogues à celles des courants sinusoïdaux et peuvent être consi-

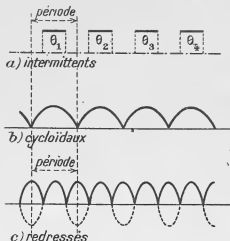


Fig. 9. — Formes de courants.

dérés comme des courants redressés. Leur période et leur fréquence, ainsi qu'il serait aisé de le démontrer, doivent être considérées comme étant les mêmes que celles du courant alternatif correspondant (c, fig. 9).

Élévation automatique de tension

Si nous serrons d'un peu plus près l'étude des phénomènes qui se produisent dans notre condensateur, nous sommes amenés à une constatation capitale.

Supposons qu'au lieu d'avoir un seul condensateur, nous ayons un système de n condensateurs disposés en série, et que, par des branchements appropriés, nous chargeons ces n condensateurs *en quantité*, au moyen d'une unique source E. Que va-t-il se passer si nous alimentons un tel dispositif au moyen de courants intermittents ? Au moment de la rupture du courant, il n'y aura

pas décharge des condensateurs puisque le système se trouvera isolé, mais, *pour une décharge éventuelle*, nous disposerons d'une différence de potentiel nE entre les armatures extrêmes, c'est-à-dire d'une tension égale à celle de la source multipliée par le nombre des éléments du système.

Ce dispositif élévateur de tension n'est autre, d'ailleurs, que celui autrefois réalisé par Planté dans sa « machine rhéostatique ».

Hystérésis diélectrique

La théorie que nous venons d'exposer revient, somme toute, à démontrer que les courants cycloïdaux traversent les diélectriques de la même manière apparente que les courants sinusoïdaux.

Nous pourrions refaire, pour ces courants pulsatoires, une théorie analogue à celle des courants alternatifs et en déduire les lois de leur propagation dans les circuits pourvus d'une certaine capacité électrique. Nous réservons cette étude particulièrement intéressante et susceptible de conduire à des suggestions extrêmement nouvelles, pour la partie de cet ouvrage où nous examinerons les phénomènes d'ordre nerveux ou d'ordre psychique. Pour ne pas alourdir un exposé que certains, peut-être, trouveront déjà trop abrupt, nous nous limiterons pour le moment à l'examen des seules notions immédiatement utiles dans l'explication des principaux faits de la dynamique musculaire.

Nous ne pouvons, cependant, terminer l'étude du condensateur sans dire deux mots d'une propriété dont il faut tenir compte pour interpréter correctement les différentes mesures qu'on peut être amené à faire relativement à ce dispositif.

On sait que la polarisation des diélectriques placés dans des champs électriques variables donne lieu à des phénomènes d'hystérésis, tout à fait analogues à ceux

qui se produisent avec les aimants soumis à des champs magnétiques qui changent périodiquement de valeur. Il en résulte que, pour une même différence de potentiel des armatures, la charge est plus grande dans le cas d'une différence de potentiel décroissante que dans le cas d'une différence de potentiel croissante (fig. 10).

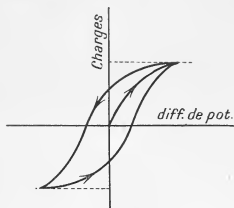


FIG. 10. — Hystérésis diélectrique.

Une conséquence de ce retard est que, pour les mêmes variations d'intensité de champ, les valeurs de la charge et, par suite, des élongations ou mouvements des armatures, dépendent tout à la fois de la nature de l'isolant et de ses états électriques antérieurs. L'effet produit est donc un décalage, ou *temps perdu*, dans l'accomplissement des manifestations mécaniques par rapport aux causes électriques qui les produisent.

De plus, les variations cycliques de l'intensité du champ, — autrement dit : une série de charges et de décharges consécutives, — donnent lieu à des pertes par hystérésis, pertes qui entraînent un dégagement de chaleur supplémentaire, s'ajoutant à celui déjà produit dans le diélectrique par effet Joule.

Champ magnétique

Nous savons, et ceci s'explique facilement par la théorie des tubes de Faraday, que la liaison électrique

établie entre les deux armatures du condensateur dont le diélectrique livre passage à un courant, est accompagnée de l'apparition d'un flux magnétique qui est dirigé parallèlement aux plans des deux armatures (fig. 11).

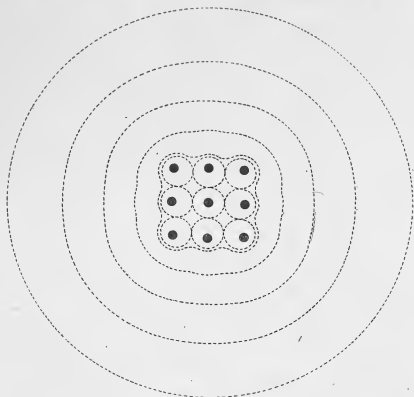


FIG. 11. — Champ magnétique.

Ce flux suit les variations du champ électrique ; il peut donc, comme lui, être appelé pulsatoire ou cycloïdal. Ce flux a une valeur égale à chaque instant, à 4π fois l'intensité du courant qui traverse le diélectrique et ne se produit pas avec un simple champ électrostatique de valeur constante, sauf dans le cas où on déplace les charges en présence.

Il y a donc apparition d'un champ magnétique dans le milieu ambiant, aussi bien dans le cas de la secousse — par déplacement des charges — que dans le cas de la contraction statique, par création de courants d'une armature à l'autre.

Nous aurons à revenir ultérieurement sur ce phénomène important.

Dispositif à répulsion

Deux corps électrisés au même signe se repoussent (fig. 12). Ce phénomène a été utilisé mécaniquement,

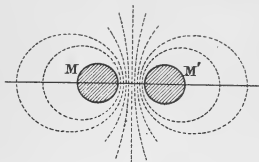


FIG. 12. — Lignes équipotentielles d'action mutuelle.

par exemple, dans les électromètres à répulsion. D'après la théorie de Maxwell, la tension des lignes de force entre les conducteurs limitant le diélectrique est comparable à celle d'un corps élastique et l'énergie du diélectrique, qui a pour expression

$$\frac{H^2}{8\pi K}$$

par unité de volume, est assimilable à l'énergie d'un ressort. Cette expression est positive ou négative selon que les masses électriques en présence sont de signes contraires ou de même signe. Le cas d'une attraction est assimilable à celui d'un ressort travaillant à la compression, celui d'une répulsion est assimilable à celui d'un ressort travaillant à la traction. Au signe près, et dans certaines limites, les travaux accomplis sont identiques.

Si nous considérons un ensemble de n sphères électrisées au même signe, de même rayon donc de même

charge, et si le déplacement de ces sphères est limité par une enveloppe souple, mais non élastique ni conductrice, il est évident que, par raison de symétrie et si nous éliminons toute composante due à la pesanteur, l'enveloppe tendra vers la forme sphérique. Pour la même raison, une bulle de savon augmente de diamètre lorsqu'on lui communique une charge électrique.

D'après ce que nous venons de dire, si, par exemple, nous prenons une enveloppe en forme d'ellipsoïde de révolution, le fait de charger électriquement les n sphères qu'elle enferme va tendre à raccourcir le grand axe et à allonger le petit axe, de manière à les égaliser tous deux au rayon de la sphère ayant même surface extérieure que l'ellipsoïde considéré. Il s'exerce donc, dans ce cas comme dans celui du condensateur précédemment examiné, un effet mécanique utilisable.

Traiter ce problème dans toute sa généralité nous conduirait à des calculs compliqués et qui, d'ailleurs, ne sont pas nécessaires pour la compréhension des phénomènes qui se produisent. Aussi, nous contenterons-nous d'examiner un cas simple, où le système se réduit à quatre sphères dont les centres sont dans un même plan et que, pour l'intelligence des explications, nous supposons reliées fictivement aux extrémités d'un parallélogramme articulé, comme cela se pourrait faire dans un régulateur à boules de moteur hydraulique ou thermique.

Si $ABCD$ (fig. 13) est la figure du système au repos, $A'B'C'D'$ sera celle qu'il prendra au bout du temps t , à l'origine duquel nous avons communiqué une charge électrique à chacun de ses éléments. Entre ces deux positions extrêmes, nous pourrions trouver une position intermédiaire $A''B''C''D''$, telle que les forces mises en jeu fassent équilibre à un poids approprié P , qui se trouvera ainsi soulevé d'une hauteur h . Par ce dispositif, nous obtenons donc bien un effet mécanique ana-

logue à celui obtenu avec le condensateur et, par une articulation appropriée, nous avons transformé une force de répulsion en une force d'attraction. L'articulation que nous avons supposée au parallélogramme nous place dans le même cas que celui de l'enveloppe imaginée au début de cette démonstration.

Remarquons toutefois que si le dispositif actuel est,

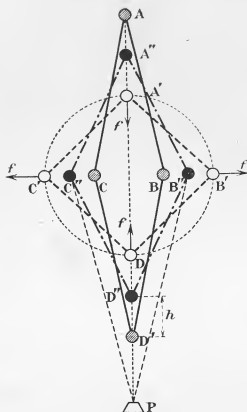


FIG. 13. — Dispositif à répulsion.

somme toute, mécaniquement équivalent à celui du condensateur, il présente sur le condensateur à diélectrique perméable cet avantage, non à dédaigner sous le rapport de la puissance électrique mise en jeu, que les charges électriques étant ici de même signe n'ont pas tendance à se recombinaer et resteront en présence tant que des charges égales et de signe contraire ne feront

pas leur apparition dans le milieu ambiant. C'est, par suite, au condensateur à diélectrique théoriquement parfait que nous pourrions assimiler le dispositif à répulsion.

En suivant un raisonnement identique à celui qui sert à établir l'équation de la période variable pendant la charge, puis pendant la décharge d'un condensateur, nous arriverions, dans le cas qui nous occupe actuellement, à déterminer les fonctions exponentielles de forme

$$V_t = \alpha V_0 \left(1 - e - \frac{t}{CR} \right) + \beta$$

qui règlent les phénomènes de charge et de décharge du système à répulsion. Nous retournons donc, comme le veut la théorie de Maxwell, vers le cas général déjà examiné avec le condensateur shunté.

Nous venons de signaler que le dispositif à répulsion était relativement économique. Cela était facile à concevoir en dehors de toute démonstration : si nous considérons, en effet, un ensemble de n éléments matériels électrisés, enfermés dans une enveloppe présentant une certaine perméabilité électrique, et que cette enveloppe soit elle-même plongée dans un milieu électrisé d'un signe contraire à celui des sphères, l'énergie emmagasinée sera fonction du volume de l'enveloppe, alors que la déperdition sera seulement fonction de sa surface. L'importance de cette remarque nous apparaîtra ultérieurement.

Une démonstration non absolument rigoureuse, mais rapide, est susceptible de nous montrer la plus grande puissance relative, — ce qui est autre chose que son économie de fonctionnement, — du dispositif actuel.

Supposons un cylindre dont les deux sections droites représentent les deux armatures d'un condensateur, alors que sur sa surface latérale seront disposés, à la même densité électrique que sur les armatures et au

même potentiel, des grains positifs d'électricité. L'attraction entre armatures est, comme on sait, inversement proportionnelle au carré de la distance a qui les sépare. Si nous isolons, par la pensée, une file de grains le long d'une des génératrices du cylindre, la répulsion de deux grains, l'un par rapport l'autre, sera aussi proportionnelle à l'inverse du carré de la distance qui les sépare. Supposons $(n + 1)$ grains répartis régulièrement sur cette génératrice, de la base au sommet; l'action totale sera fonction inverse de $n^2 a^2$. D'où nous concluons que le rapport reliant les puissances respectives des deux systèmes, l'attracteur et le répulseur, sera de la forme Kn^2 , K représentant le rapport de la surface des sections droites à la surface latérale du cylindre. Pour faciliter les explications ultérieures, nous appellerons ce rapport *facteur de forme* du cylindre.

En dernière analyse nous constatons que, une fois encore, nous avons été ramené à identifier le dispositif à attraction et le dispositif à répulsion : dans l'une et dans l'autre, toutes choses égales d'ailleurs, la puissance augmente toujours quand diminuent les distances d'action des masses électrisées, ainsi que nous l'avons signalé en parlant de la force portante. Ce qui fait la supériorité du dispositif à réaction, dans la supposition que nous venons de faire, c'est que les éléments y agissent à des distances respectives n fois plus petites que dans le dispositif à action attractive. C'est là tout le secret de l'appareil...

Conclusion

Il est inutile, croyons-nous, d'exposer théoriquement, dans toutes ses conséquences, le fonctionnement du condensateur à diélectrique perméable. Pour la clarté des explications, il est préférable de les appliquer désormais directement aux faits que la pratique des laboratoires de physiologie a mis en évidence.

Nous nous limiterons, toutefois, à l'examen de ceux d'entre ces faits qui peuvent présenter une utilité incontestable pour une connaissance à la fois précise et claire du fonctionnement de la machine animale. Les résultats d'expériences ont, en effet, été recueillis par milliers; quelques-uns apparaîtront comme une lumineuse démonstration des phénomènes réels qui s'accomplissent au cours des diverses manifestations de l'énergie vitale; l'inanité des autres et leur manque total d'intérêt se démontreront d'eux-mêmes et les feront tomber dans l'oubli. Ainsi s'opérera, par un processus automatique et pour un rationalisme mieux affirmé de la science physiologique, le tri des notions utiles d'avec celles qui ne sauraient l'être à aucun titre.

LE MUSCLE, CONDENSATEUR ÉLECTRIQUE

Le muscle n'est rien autre chose qu'un condensateur électrique...

Une telle proposition n'a pas à être démontrée, car elle constitue en elle-même une simple évidence.

Avec ses alternances régulières de disques sombres et de disques clairs, de disques épais et de disques minces, la structure anatomique de la fibrille du muscle strié ne nous donne pas seulement la représentation visuelle d'un couplage de condensateurs : au delà de l'analogie de formes que révèle cette stratification merveilleusement ordonnée, nous sommes autorisés à voir quelque chose de plus qu'une simple analogie de fonctionnement et à affirmer la stricte identité de deux dispositifs électromécaniques. Un très bref raisonnement peut nous en convaincre sur-le-champ.

La théorie élémentaire de l'électricité distingue deux sortes de corps : les conducteurs et les isolants. Un examen un peu plus approfondi nous montre qu'en réalité tout conducteur est un peu isolant et tout isolant un peu conducteur. Simple question de relativité entre deux propriétés antagonistes... En dehors de toute autre considération telle que le poids spécifique, le coefficient de dilatation ou le module d'élasticité, deux matières de composition chimique différente peuvent se distinguer par leurs conductibilités électriques inégales. De telle sorte que, par comparaison d'une substance à l'autre, celle qui possède la plus petite résisti-

vité peut être regardée comme *conductrice* au regard de la seconde, qui sera considérée comme *isolante*. Or, par définition, il se produit toujours un effet de condensation électrique au contact de deux substances hétérogènes intercalées dans un circuit et, si cet effet est plus ou moins mesurable, il n'en demeure pas moins certain.

Une architecture telle que celle de la fibrille musculaire, qui juxtapose en couches parallèles et régulièrement distribuées deux matériaux que leur hétérogénéité oblige à posséder des résistivités différentes, constitue donc un dispositif possédant inéluctablement, par sa construction même, une certaine capacité électrique. En d'autres termes, ces alternances de conducteurs et d'isolants, — même dans le cas où il s'agit de substances qui ne sont ni nettement conductrices comme les métaux, ni nettement isolantes comme le verre ou le mica, — ces alternances forment une succession de condensateurs. Il n'y a là, dans sa plus grande généralité, qu'une stricte application des lois essentielles de l'électricité, application qui justifie la proposition antérieurement formulée : il est de toute évidence que le muscle est un condensateur...

Construit sur un plan qui lui est spécial, ce condensateur possède également des propriétés qui lui sont particulières, mais que l'exposé théorique fait au chapitre précédent nous aide à discerner très rapidement et sans aucune difficulté.

La fibrille musculaire

Le muscle est une sommation de fibres musculaires toutes homologues. Nous pouvons donc dire que les propriétés dynamiques du muscle sont tout entières dans sa fibre élémentaire. Celle-ci, limitée par le sarcolemme, comprend le sarcoplasme et les fibrilles élémentaires proprement dites, fibrilles striées ou myoplasme.

Si nous avons encore quelques doutes sur l'origine électrique du fonctionnement du muscle, ces doutes seraient levés par l'observation suivante, faite depuis longtemps par les anatomistes : dans le faisceau strié, les fibrilles sont placées de telle sorte qu'il y a correspondance à peu près exacte entre leurs parties obscures. Cette disposition, qui ne serait pas nécessaire dans un appareil où la seule élasticité des éléments constituerait l'essentiel de son mécanisme, est une condition de bon fonctionnement électrique : les isolants sont limitrophes des isolants et les conducteurs des conducteurs. Ainsi sont assurées la constance et l'économie de marche.

Il nous suffit de scruter le schéma classique de la fibrille élémentaire pour déterminer immédiatement l'appropriation de chacune de ses parties. L'observation a montré, d'une manière que nous croyons acceptée aujourd'hui par tous les auteurs, que :

1° Les disques clairs sont formés de sels de potassium à l'état semi-liquide ;

2° Les disques épais sont de structure spongieuse, les alvéoles étant ouvertes du côté de la membrane de KRAUSE et fermées du côté de la strie de HENSEN ;

3° Lors de la contraction, les disques sombres épais apparaissent comme l'élément déformable, tendant vers la forme globulaire.

Ces conditions étant admises, il n'y a aucun doute que les disques clairs sont conducteurs et représentent les armatures du condensateur, alors que les disques sombres constituent le diélectrique élastique. Ainsi qu'il sera indiqué au chapitre des *mesures*, il existe un moyen simple, par comparaison des indices de réfraction lumineuse, de chiffrer la constante diélectrique de la substance isolante du muscle, par comparaison avec les isolants industriels.

Comme conséquence des principes précédemment

énoncés, qui montrent comment se comportent les isolants impurs et, en particulier, ceux qui renferment des traces d'eau, le diélectrique musculaire est obligatoirement semi-conducteur.

Nous n'avons pas à tenir compte ici de la théorie, aussi contestable que contestée, sur la diversité des fonctions mécaniques de chacune des sortes de disques. Cette théorie n'a été établie que pour essayer de faire comprendre une chose jusqu'à présent inexpliquée : la

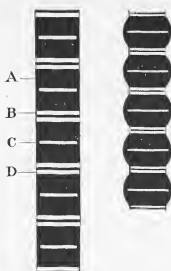


FIG. 14. — Fibrille striée au repos (à gauche)
et en contraction (à droite).

A disque sombre, B disque clair, C strie de HENSEN, D bande d'AMICI.

contraction musculaire. Mais le fait que les disques clairs présentent une certaine élasticité — commune, à des degrés divers, à tous les tissus animaux ou végétaux, — ne saurait en rien infirmer l'exposé que nous faisons actuellement.

La bande d'AMICI, ou disque sombre mince, séparant en deux feuillets parallèles chaque disque clair, possède les mêmes propriétés que les disques épais. Elle apparaît donc comme un isolant interposé entre les armatures de deux éléments successifs ; elle améliore le rendement

et la rapidité d'action de l'appareil, pour une raison que nous allons expliquer.

Les stries de HENSEN, qui subdivisent en deux ou plusieurs parties, parallèlement aux armatures, les disques sombres épais, présentent les propriétés du disque clair. Elles apparaissent donc comme des conducteurs intermédiaires susceptibles d'augmenter, comme la bande d'AMICI, l'instantanéité d'action du dispositif. Nous verrons, en effet, en étudiant la source qui alimente en électricité le muscle et les différents organes de l'animal que, comme en télégraphie, tous les montages sont monopolaires; le pôle négatif est toujours branché à la « terre » qui est, ici, constituée par la masse sanguine. Dans ces conditions, tous les disques clairs sont positifs; les stries de HENSEN chargées par influence sont alternativement négatives et positives à partir d'un disque clair. Leur présence ne modifie pas l'énergie du système; mais ces stries constituent des relais qui, tout à la fois, diminuent l'inertie de l'appareil et augmentent la conductibilité du diélectrique.

Le sarcoplasme

Le sarcoplasme enveloppe le faisceau des fibrilles striées et est limité par le sarcolemme qui, pour ce qui nous occupe, doit être considéré comme une simple paroi isolante. Par contre, la structure granuleuse et nucléée du sarcoplasme doit retenir notre attention, parce qu'elle constitue un système pourvu d'une certaine capacité électrique, résultant d'une sommation des capacités élémentaires de chacun de ses corpuscules granuleux.

Nous n'avons pas besoin de rappeler cette loi fondamentale de l'électrostatique, en vertu de laquelle lorsqu'on permet un déplacement relatif à un système de conducteurs chargés, sous la seule influence des

forces électriques en présence, on modifie l'énergie du système. En particulier, si le déplacement s'opère à potentiel constant, c'est-à-dire en assurant la liaison du système avec une source de force électromotrice telle qu'une pile, l'énergie potentielle s'accroît d'une quantité égale au travail des forces électriques, travail qui est positif et emprunté à la source maintenant le potentiel constant.

Nous savons aussi que cette énergie se compose de deux parties égales, l'une produisant le travail de déplacement, l'autre augmentant l'énergie potentielle du système qui, comme sa capacité, tend vers un maximum. Il en résulte que, de même que nous avons reconnu dans la fibrille striée un ensemble de condensateurs plans à diélectrique élastique et perméable, de même nous devons reconnaître dans le sarcoplasme le dispositif à répulsion, tendant vers la forme globulaire chaque fois qu'on lui communique une charge, et que nous avons, dans notre étude théorique, assimilé, quant à ses propriétés électriques, au condensateur à diélectrique pratiquement parfait.

Toutes choses égales d'ailleurs, le sarcoplasme possède une plus grande capacité électrique. La période variable pendant laquelle le débit de la source est employé à charger les éléments, se trouve allongée par rapport à la période correspondante de la fibrille striée. C'est ce qu'indiquent bien les courbes V' et V (fig. 3) établies théoriquement; c'est aussi ce que montrent nettement les diagrammes qui ont été relevés expérimentalement.

La théorie nous dit aussi que, pour un même diélectrique semi-conducteur, ce dispositif est celui qui, *ceteris paribus*, présente les moindres « fuites » d'électricité, ou la plus faible déperdition d'énergie. Sur ce point également, l'expérience est parfaitement d'accord avec les indications de la théorie.

En résumé, les lois de l'électricité nous autorisent pleinement à assimiler le muscle à un condensateur, la fibrille musculaire striée jouant le rôle du condensateur possédant un diélectrique à faible résistance ohmique et le sarcoplasme, celui du condensateur à diélectrique de grande résistance ohmique. Nous allons constater que, plus nous regardons de près le fonctionnement du muscle, plus nous nous apercevons que l'assimilation peut être poursuivie dans ses ultimes conséquences.

Le muscle à fibres lisses

Comme le sarcoplasme, le muscle à fibres lisses est un appareil à répulsions électrostatiques. Nous rappelant les indications théoriques qui accompagnaient la figure 13, il nous suffit de regarder les deux aspects

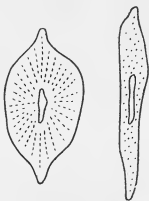


FIG. 15. — Fibrille lisse au repos (à gauche), contractée (à droite).

(fig. 15) d'une fibre lisse à l'état de repos, puis à l'état de tension, pour découvrir l'identité des deux mécanismes sans qu'il soit nécessaire de plus insister.

Ce qui a été dit du sarcoplasme s'applique à la fibre lisse. Toutefois, il convient de remarquer que la lenteur d'action du dispositif est chose toute relative : une

simple variation des facteurs, — en particulier, la conductibilité relative du diélectrique, — qui règlent la période variable et la courbe de V montera plus rapidement, se rapprochant de l'axe des ordonnées.

La structure granuleuse de certaines fibres lisses s'explique d'elle-même, au point de vue électrique. Quant aux stries longitudinales, elles ne représentent que des cloisons isolantes subdivisant la fibre en compartiments dont chacun agit individuellement, la sommation des actions élémentaires donnant, moins une petite perte inévitable, l'action totale observée.

Le muscle, dispositif dualiste

La fibrille striée et la fibre lisse jouissent de propriétés non pas antagonistes, mais complémentaires. La théorie indique, comme nous avons eu l'occasion de l'étudier précédemment, et l'expérience confirme que :

1° La fibre lisse donne une contraction lente, durable, puissante, économique ;

2° La fibrille striée, ou myoplasme, donne une contraction prompte, précise, mais alimentée par des excitations toujours renouvelées, donc au prix d'une dépense supérieure d'énergie.

Le muscle doit répondre par ses mouvements aux besoins de l'animal. Si divers que soient ces besoins, les mouvements qu'ils provoquent ne dépendent essentiellement que d'un nombre limité de facteurs qui sont l'amplitude, la durée et la puissance.

Comme qualités accessoires, le muscle devra posséder la souplesse d'adaptation, la précision et la sensibilité, ce dernier mot étant pris dans le sens que lui accordent les physiiciens dans la critique des appareils de mesures.

Selon le but à atteindre, selon les qualités moyennes qui lui seront nécessaires pour remplir au mieux et dans tous les cas la fonction qui lui a été assignée, le muscle possède une organisation variable en fibres de l'une ou

de l'autre sorte. On peut dire, en somme, que la nature a réalisé la discussion complète de la courbe fondamentale $V + V'$. *Ce qui classe les muscles, c'est la qualité du travail qu'ils ont à fournir.*

Et c'est pourquoi les muscles de la vie végétative, ou inconsciente, n'ayant à satisfaire qu'au tran-tran de

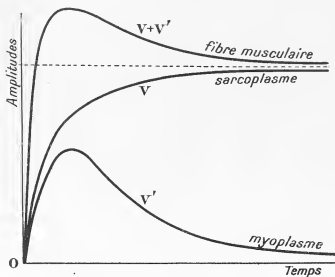


FIG. 16. — Dualisme de fonctionnement du muscle.

l'existence quotidienne, possèdent une organisation moins complexe que les muscles squelettiques, obligés à s'adapter rapidement et précisément aux circonstances toujours changeantes de la vie consciente. Faut-il donner un « coup de collier », faut-il se mettre vite en action pour défendre l'existence menacée ? L'association du sarcoplasme, qui apporte la puissance, et du myoplasme, qui apporte sa sensibilité et sa souplesse d'adaptation, s'impose. Pour cette raison, le cœur, qui doit obéir à un travail subitement accru dans certaines circonstances, le cœur échappe à la règle autrefois posée quant à la structure musculaire de la vie automatique et comporte des fibrilles striées, nécessaires au réglage quasi instantané de son rythme.

Le muscle est donc, ainsi que nous venons de le faire ressortir en procédant de considérations d'un ordre purement mécanique et théorique, un appareil dualiste ou *différentiel*, ainsi que BOTTAZZI l'a exposé à partir de vues exclusivement physiologiques et expérimentales.

Aussi, combien devons-nous admirer le travail accompli par la nature qui, en s'aidant de cet unique procédé qu'est l'application des forces newtonniennes possédées par les charges électriques mises en présence les unes des autres, a su construire l'appareil dont les types multiples peuvent répondre aux exigences mécaniques les plus diverses !

Le muscle, solide d'égale résistance

Si le muscle, dans sa structure, réalise cet optimum qui lui permet de fonctionner avec la moindre dépense moyenne d'énergie par rapport aux résultats obtenus, il est également remarquable de constater que la fibre musculaire possède toujours — et que le muscle entier tend toujours à posséder — la forme qui conduit à la plus grande économie de matière, donc à la plus grande économie d'entretien du dispositif mécanique. Cette forme est celle du solide d'égale résistance à la compression, ou à l'extension, qui ont tous deux, dans les conditions de charge où nous avons été amenés à les étudier, le même profil parabolique.

Le muscle, machine réversible

Le muscle est une machine réversible, au même titre que la dynamo qui fonctionne en génératrice si on l'anime d'un mouvement de rotation et qui fonctionne comme moteur quand on lui fournit de l'électricité. Les animaux pourvus de la faculté d'électrogénèse, comme les torpilles et les gymnotes, nous en fournissent la preuve.

Tous les physiologistes sont d'accord pour assimiler à un muscle l'appareil générateur d'électricité de ces poissons. Et c'est ici le lieu de s'étonner de ce fait : pourquoi ceux qui ont reconnu qu'un muscle pouvait donner des décharges comme une bouteille de LEYDE n'ont-ils pas songé à retourner cette proposition et à assimiler le muscle à un condensateur ? Il est vrai que si nous étions frappés par toutes les analogies qui s'offrent à nous sans que nous les apercevions, il n'y aurait plus de mystères dans les problèmes de la vie.

Schématiquement, le générateur d'électricité des torpilles et des gymnotes est rigoureusement identique à la machine rhéostatique de PLANTÉ : files de condensateurs chargés en quantité et déchargés en tension. Le nombre des éléments étant extrêmement élevé, — on le chiffre à environ 200 000 dans chaque prisme circonscrit par les lames conjonctives, — il devient évident que, même avec une source de très basse tension, comprise entre 0 et 1 volt, l'animal peut, au besoin, lancer des décharges d'une tension de plusieurs milliers de volts.

Il ne faut voir, somme toute, dans ce phénomène, qu'une simple spécialisation d'un organe, spécialisation développée par certains animaux qui y ont trouvé un excellent moyen de défense et d'attaque. Par un entraînement approprié, tous les animaux pourraient arriver à posséder cette faculté d'électrogénèse au même degré que les torpilles, car tous la possèdent déjà à l'état latent : certains la mettent en jeu à de rares intervalles pour produire cette décharge intérieure qui doit les ranimer ou les réchauffer et qui s'appelle le frisson et l'éternuement ; certains l'utilisent plus couramment et s'en servent pour produire la phosphorescence, phénomène si curieux, si intéressant, et pourtant si simple, auquel nous consacrerons ultérieurement un développement spécial.

Mais que gagneraient les animaux qui vivent dans

l'air à activer leurs facultés électrogénétiques ? Les poissons qui vivent dans l'eau salée ou dans l'eau impure des étangs, c'est-à-dire dans un liquide assez bon conducteur de l'électricité, peuvent, par le moyen des décharges, atteindre leur ennemi à distance. Que pourrions-nous atteindre dans notre atmosphère mauvaise conductrice ? Paralyser un ennemi qui aurait déjà porté la main sur nous ? Pas même : notre peau est un isolant assez affirmé et nous risquerions de nous foudroyer nous-mêmes...

La théorie que nous venons de développer ne diffère pas essentiellement de celle donnée autrefois par RANVIER pour expliquer le mode d'action des gymnotes. D'après cet auteur, les lames de leur organe électrique forment de véritables condensateurs se chargeant sous l'influence du fluide négatif envoyé le long du cylindre-axe par les cellules nerveuses du lobe électrique, la seconde armature se chargeant par influence.

L'objection faite à cette théorie est que la couche intermédiaire n'est pas assez isolante pour jouer le rôle de diélectrique. Cette objection n'a aucune valeur : la différence de potentiel entre deux lames est relativement faible et de l'ordre du demi-volt ; l'isolement est donc suffisant. Mais, d'après nos vues, le lobe électrique et le cylindre-axe ne sont que les déclencheurs de la décharge dont l'énergie est empruntée au couple hydro-électrique sanguin.

On a remarqué que, si on place dans un même aquarium des torpilles et d'autres poissons, aucune torpille ne paraît incommodée, alors que tous les autres poissons sont foudroyés : ce phénomène tient tout simplement à ce que les organes électriques des autres torpilles fonctionnent à ce moment « en réceptrices » et se chargent, tandis que, non adapté, le système musculaire des autres poissons ne peut supporter une tension aussi élevée.

Il ne faut pas confondre les phénomènes d'électro-génèse dont nous venons de parler avec la production d'électricité statique par frottement sur un épiderme sec, sur les cheveux ou les poils de certains animaux, lorsque l'état hygrométrique de l'air est favorable à une telle expérience.

Le muscle, générateur de champs magnétiques

Dans notre exposé théorique, nous avons fait remarquer que, perpendiculairement au champ électrostatique s'établit un champ magnétique. Ce champ existe aussi dans le muscle en fonctionnement et ses lignes de force sont situées parallèlement aux plans de striation.

Le champ magnétique musculaire traverse le myolemme et tous les tissus qui l'enveloppent ; il s'établit donc dans tout l'espace environnant.

Ici encore, l'expérience a confirmé les vues théoriques : Ch. FÉRÉ, opérant à Bicêtre, a pu constater une augmentation de force musculaire, chez ses sujets, du côté où il appliquait un aimant ou le présentait à distance. Ce fait s'explique très facilement : la concentration des lignes de force magnétiques environnant le muscle, au moyen d'un aimant, entraîne une concentration corrélative des lignes de force du champ électrostatique entre armatures du condensateur-muscle.

Il ne faut pas confondre ce champ magnétique avec le champ électrostatique du condensateur. Les lignes de force de ce dernier sont perpendiculaires aux lignes de force du premier. C'est très certainement la photographie du champ électrostatique que l'on obtient lorsqu'on pose la main, dans un bain révélateur, sur une plaque photographique non impressionnée. C'est peut-être aussi ce champ qui agit dans les *passes* dites « magnétiques ». Nous avons d'autant plus tendance à le croire que le souffle de l'opérateur, — chargé néga-

tivement par les ions OH de la respiration, — annihile l'effet de ce champ positif.

Le muscle, détecteur d'ondes électromagnétiques

Sans plus de difficulté, nous concevons pour quelles raisons H. DU BOIS-REYMOND a pu réaliser son expérience de télégraphie musculaire, d'ARSONVAL son expérience de téléphonie et LEFEUVRE sa réception de messages radiotélégraphiques par l'intermédiaire des gastrocnémiens d'une grenouille. Après ce que nous avons dit, la théorie de telles actions s'établit d'elle-

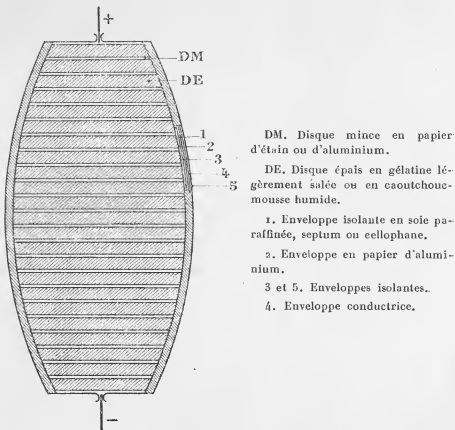


FIG. 17. — Appareil de démonstration.

même, et nous devons admirer encore la merveilleuse souplesse d'un appareil qui réagit aux ondes d'amplitude et de formes extrêmement diverses.

Et, comme l'avait entrevu CHEVREUL, c'est bien dans les bras de l'expérimentateur que se trouve le détecteur des sourciers.

Appareil de démonstration

Il est aisé de réaliser un muscle artificiel pouvant servir d'appareil de démonstration et permettant de répéter, quoique à une échelle différente, la plupart des expériences fondamentales par lesquelles on éclaire le fonctionnement du mécanisme musculaire. Il est inutile de donner une longue description de ce dispositif extrêmement simple et la figure 17 fait comprendre tout de suite comment on peut l'établir. Cette construction comporte un nombre infini de variantes.

Un tel appareil de démonstration n'est d'ailleurs pas nécessaire : à cette différence près, qu'il s'agit ici d'attractions créées par des champs électrostatiques au lieu d'attractions créées par des champs électro-magnétiques, le muscle à fibrille striée fonctionne d'une manière tout à fait analogue à celle d'une simple sonnerie électrique. La comparaison peut être poussée assez loin pour constituer une excellente méthode démonstrative.

LA SOURCE D'ÉLECTRICITÉ

Le muscle consomme de l'électricité. Nous sommes donc amenés à rechercher quelle est la source susceptible de l'alimenter. Or, jusqu'à ce jour, aucun expérimentateur ne nous a signalé son existence. C'est donc qu'il n'existe dans le corps de l'animal aucun organe particulièrement affecté à cette fonction. S'il en existait un, nous le saurions depuis longtemps : la quantité d'électricité qu'il serait astreint à produire pour être répartie partout où il en est besoin pour le fonctionnement de l'organisme, représente une quantité d'énergie assez importante pour qu'elle ne puisse échapper aux investigations des physiologistes.

L'expérience ne nous ayant fourni aucun renseignement appréciable sur le sujet qui nous préoccupe, force nous est bien de nous rabattre sur le pur raisonnement si nous voulons abrégé nos recherches.

Les muscles sont répartis à peu près dans tous les endroits de la machine animale, des extrémités des membres jusqu'à la tête, du nez à la queue, de la langue à l'intestin. Il n'est pas possible qu'une source unique alimente un aussi grand nombre d'organes : les conducteurs réalisables avec les matériaux qui constituent un organisme animal ne sont, nous le savons, que des semi-conducteurs ; l'électricité s'y transmet avec une vitesse réduite et avec des pertes sensibles.

Supposer une source unique d'électricité nous conduirait donc inéluctablement à admettre que l'animal, sous le rapport du rendement, se place au bas de l'échelle de tous les mécanismes et nous démontrerait,

peut-être, qu'il n'est pas viable... Il y a là une contradiction trop évidente avec tous les autres faits d'observation pour que l'hypothèse de la source unique puisse être retenue.

Si les sources sont multiples, il est évident qu'en vertu de ce principe d'économie fonctionnelle qui se retrouve partout dans l'organisme animal, ces sources sont au plus près des appareils d'utilisation, c'est-à-dire des muscles en premier lieu.

Or, si nous réfléchissons, d'autre part, à ce fait qu'une substance ne peut produire, à elle seule, un couple électrique, et qu'il faut au moins deux corps en présence ; si nous nous rappelons que les effets thermo-électriques exigent, pour fournir une quantité appréciable d'électricité, des différences importantes de température et que le contact, à sec, de deux substances hétérogènes n'engendre que des traces d'énergie, nous sommes immédiatement amenés à penser que c'est uniquement vers la classe des piles hydro-électriques que doivent être orientées nos recherches.

Deux substances ou deux groupes de substances en présence, par l'intermédiaire d'un électrolyte, tel est le matériel minimum exigé pour le fonctionnement de la pile. Mais, comme tous les autres couples, celui-ci va se polariser en fonctionnant : il faut donc que, soit par voie chimique, soit par « balayage » mécanique, une quantité suffisante d'oxygène lui soit fournie quand il marche à circuit fermé.

Et c'est pourquoi l'idée nous vient tout naturellement que le sang joue ici un rôle capital.

Poursuivons notre raisonnement : le sang ne peut jouer le rôle à lui seul ; la pile, en effet, ne doit débiter, dans la vie consciente, qu'à la volonté de l'animal et, dans la vie inconsciente, que suivant ses besoins. Si donc le sang renferme un des deux groupes de substances, ainsi que l'électrolyte, il est nécessaire, pour

que le dispositif n'use pas toute son énergie en court-circuit, que le second groupe de substances soit hors du sang. Dans ces conditions, la paroi poreuse qui va les séparer, par un montage analogue à celui qui est réalisé dans toutes les piles, sera obligatoirement la membrane du vaisseau capillaire.

Or, la physiologie nous apprend que cette membrane est à perméabilité variable : Pierre GIRARD a montré que le passage des ions Ba d'une solution de $Ba Cl^2$, à travers un septum séparant cette solution d'une certaine quantité d'eau pure, était entravée pour une certaine orientation du champ de polarisation du septum correspondant à l'addition d'ions H, et que pour une orientation de sens inverse, correspondant à l'addition d'ions OH, c'étaient les ions Cl qui étaient arrêtés. Ce qu'il nous faut retenir de cette expérience capitale, qui éclaire nettement le fonctionnement de la source électrique animale, c'est qu'une paroi poreuse polarisée modifie le passage des ions d'un milieu vers l'autre.

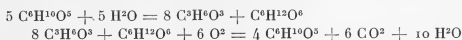
Nous saisissons donc maintenant les principaux détails d'une organisation évidemment complexe, dont il est assez malaisé de pénétrer tous les secrets, mais qui, dans son essentiel, se réduit à ceci :

La source d'électricité animale est une pile hydro-électrique, constituée d'une part par l'hémoglobine et le plasma sanguin (solution de sels de sodium) et, de l'autre côté de la paroi poreuse du capillaire, par le glycogène et le phosphate acide de potassium.

A l'état de repos, la membrane de séparation ne permettant pas le déplacement des ions corrélatif à une production d'électricité, la pile est à circuit ouvert et ne fonctionne pas ; si la membrane se polarise à la suite d'une impulsion nerveuse, le circuit se ferme et la pile entre en fonctionnement. Ainsi est réalisé l'interrupteur automatique qui permet de régler la dépense d'énergie électrique selon les nécessités et de produire les courants

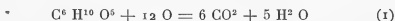
cycloïdaux nécessaires au fonctionnement régulateur des fibres striées.

Nous pensons que les équations chimiques de consommation les plus simplement représentatives des réactions, probablement très complexes, qui se produisent lors de l'électrogénèse animale, sont celles qui ont été indiquées par MEYERHOF :

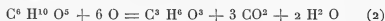


Cette équation établit que, dans chaque cycle chimique, il y a consommation d'une molécule de glycogène, avec formation d'acide lactique : celui-ci, en se combinant avec l'oxygène apporté par le sang, reforme une partie du glycogène et libère de l'eau et de l'acide carbonique, enlevés par le sang et conduits aux poumons.

L'équation la plus simple de consommation du glycogène par le couple hydro-électrique peut s'écrire :



L'expérience montrant toutefois qu'il y a formation d'acide sarcolactique, nous devons ainsi modifier l'équation fondamentale :

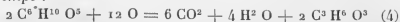


Deux molécules d'acide sarcolactique, en abandonnant une molécule d'eau, redonnent une molécule de glycogène :



De telle sorte que nous pouvons écrire, comme symbolique du cycle alternatif de fonctionnement du couple :

1^{er} temps :



En additionnant membre à membre les équations (4) et (5) et en faisant les réductions nécessaires, nous retrouvons l'équation simplifiée primitive (1).

Le fer de l'hémoglobine joue probablement le rôle de catalyseur vis-à-vis de l'oxygène, en même temps qu'il resserre les lignes de force du champ magnétique développé pendant le fonctionnement musculaire, augmentant ainsi le rendement du dispositif.

Ici donc, absolument comme dans les piles ordinaires, l'oxygène agit comme le dépolarisant, le dégraisseur de l'élément hydro-électrique. C'est pour cette raison qu'il

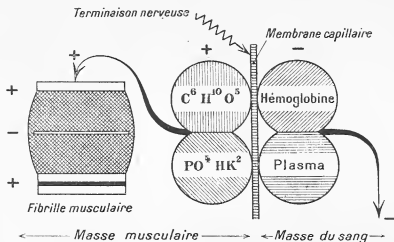


FIG. 18. — Schéma du fonctionnement électrique de la fibrille musculaire.

conserve l'irritabilité du muscle isolé au repos (LIEBIG), et qu'il retarde l'apparition de la fatigue du muscle en travail (LUDWIG et SCHMIDT).

Il est à remarquer que le cycle alternatif des réactions concorde avec la nécessité de production de courants cycloïdaux.

Nous avons été contraints de laisser, dans cet exposé, une large part à l'hypothèse. Nous nous permettrons, cependant, de faire remarquer que si cette théorie n'est pas entièrement conforme à la réalité, — et quelle théorie pourrait prétendre à ce rôle ? — elle est tout au moins en parfait accord avec les plus récents travaux de A. V. HILL qui soient venus à notre connaissance.

Nous avons eu la curiosité de constituer un élément semblable à celui dont nous venons de parler, sous forme d'une petite pile à deux liquides, formée d'une part par du glycogène et du phosphate acide de potassium, d'autre part, avec de l'hémoglobine dans une solution de sel marin. M. NOUVION, que je tiens ici à remercier de sa bonne collaboration, a pu mesurer à l'électromètre une différence de potentiel, entre électrodes, qui a varié, selon les circonstances de l'expérience, de 0,225 à 0,5 volt. Malheureusement, ne disposant pas du matériel nécessaire pour effectuer les mesures en mettant les solutions salines à l'abri de l'air, nous avons dû laisser subsister une importante cause d'erreur, qui nous interdit de faire état des chiffres trouvés.

Toutefois, ce résultat nous a semblé suffisamment intéressant pour que nous ayons décidé de poursuivre l'étude de ce couple, de sa polarisation pendant le fonctionnement et de sa variation de température pendant le débit électrique. Les différents chiffres relevés seront publiés en annexe au présent ouvrage.

En résumé, la source d'énergie électrique chez l'animal semble être constituée par un couple hydro-électrique semblable à celui que nous venons de définir. Le branchement en est fait comme dans les montages usités en télégraphie, où l'un des pôles est relié à la terre, la « masse » étant ici constituée par l'ensemble du liquide sanguin. Le fonctionnement est endothermique. Le couple consomme, pendant sa marche, une partie des réserves de glycogène accumulées

dans le muscle lors des périodes de repos de l'animal.

Nous croyons inutile d'entrer dans l'infinité des détails, d'ailleurs extrêmement importants au point de vue du comportement de la machine animale, qu'entraîne la théorie que nous venons d'exposer : notre but a seulement été d'ouvrir une voie nouvelle aux recherches.

ÉLECTRODYNAMIQUE MUSCULAIRE

Nous n'avons jusqu'à présent examiné qu'un aspect de la machine musculaire. Nous avons indiqué sur quels principes était basée sa structure et quel genre d'énergie il était nécessaire de lui fournir pour la mettre en action. Il nous reste maintenant à étudier le muscle au travail, autrement dit, à rechercher quelles sont les lois principales de la dynamique musculaire et à en faire un exposé succinct aussi rationnel qu'il est possible en l'état actuel de nos connaissances.

L'exposé que nous allons faire a comme principe directeur l'application directe de la théorie précédemment développée. Nous en profiterons pour montrer que les conséquences auxquelles conduit cette théorie sont en parfait accord avec les principaux faits que l'expérience a mis en lumière.

Ayant soin de nous conformer aux méthodes didactiques suivies dans l'explication du fonctionnement des machines ordinaires, car ces méthodes ont fait leurs preuves de rationalisme et de fécondité, nous séparerons en deux parties distinctes l'étude des appareils d'utilisation ou de transformation d'énergie, — en l'espèce, l'appareil musculaire, — et celle de la source qui lui fournit cette énergie, que nous croyons être, tout simplement, une pile hydro-électrique. La dynamique musculaire se limite à la première partie : ainsi fait-on en hydraulique, où la marche des roues ou des turbines est exposée indépendamment des lois de l'écou-

lement des liquides dans les canaux ; ainsi fait-on, également, en thermodynamique où la machine à vapeur est décrite indépendamment de la chaudière.

Reportant donc à plus tard l'étude du générateur d'électricité, nous nous bornerons à définir les principales règles du fonctionnement statique et du fonctionnement cinématique qui constituent toute la dynamique de l'appareil musculaire.

Avant toutes choses, ce nous est une obligation de bien spécifier qu'une distinction reste presque toujours à établir entre les conditions réelles de fonctionnement du muscle et celles qui ont été observées dans les laboratoires où, pour mettre le muscle en action, on ne lui applique que des courants n'ayant, comme valeur ou comme forme, aucun rapport étroit avec ceux qui alimentent le muscle vivant. Fort heureusement, ainsi que nous l'avons déjà dit, le muscle est un appareil présentant une merveilleuse souplesse d'adaptation aux conditions électriques les plus diverses et les phénomènes constatés sont presque toujours de même sens que les phénomènes réels. S'il en était autrement, la physiologie du muscle ne serait guère plus avancée que celle du nerf.

La secousse, diagramme du moteur vivant

La contraction du muscle, provoquée artificiellement par des moyens électriques, est une opération qui, en dehors de sa valeur démonstrative, est susceptible de donner d'utiles renseignements sur la structure particulière d'un muscle. On peut dire que le diagramme de la secousse constitue la courbe *caractéristique* du muscle-moteur.

La secousse est obtenue en appliquant une excitation unique au muscle isolé. Ce qu'on appelle, en physiologie, appliquer une excitation unique est identique-

ment la même opération que ce qu'on appelle, en électricité, *charger* une capacité.

Il est parfaitement inutile, pour le but que nous poursuivons, d'examiner les divers modes d'excitation électrique ou mécanique employés dans les laboratoires : tous ne conduisent qu'à une opération identique de charge électrique communiquée au muscle.

Ainsi qu'il résulte des considérations précédemment exposées, les diagrammes relevés soit sur différents muscles, soit sur un même muscle, mais dans des conditions différentes de température (fig. 19), de force électromotrice, de poids antagoniste, etc., ne sont que des illustrations d'une discussion complète des

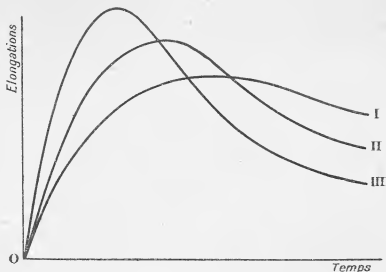


FIG. 19. — La résistance ohmique diminue quand la température s'élève. Si r' diminue, les intensités croissent donc également les charges électriques dans des temps égaux, ce que traduisent les courbes théoriques I, II et III. Ces courbes sont conformes aux courbes des amplitudes en fonction de la température qui ont été établies par MAREY.

équations fondamentales, où l'on fait varier séparément chacune des quantités qui déterminent ces équations.

Sans aucune exception, toutes les indications fournies par l'expérience sont en concordance absolue avec

celles qui proviennent de la théorie. La machine musculaire obéit donc aux mêmes lois que toutes les autres machines.

La théorie peut même prévoir certains cas difficiles, si ce n'est impossibles, à réaliser expérimentalement. Par exemple, pour un même muscle, l'amplitude de la secousse sera diminuée et, corrélativement, sa durée allongée au fur et à mesure que le sujet avance en âge. C'est, en effet, une loi constante que le vieillissement des tissus entraîne leur durcissement, c'est-à-dire la diminution de leur élasticité. Si, dans les équations fondamentales de la secousse, nous tenons compte de cette modification du coefficient d'élasticité de la matière constituant les disques sombres de la fibrille, la discussion nous fait apparaître une diminution de l'amplitude ou un allongement de la durée, donnant à la courbe représentative une forme plus aplatie.

Un seul fait d'expérience semble échapper à la théorie générale, mais cela tient uniquement à ce que nous n'avons pas exposé cette théorie dans tous ses développements. Il s'agit du fait suivant : la charge, c'est-à-dire le poids qu'on oppose à un muscle excité, devient elle-même, lorsqu'elle est faible, une cause d'excitation ; sous son influence, les secousses deviennent plus hautes et plus brèves que dans l'expérience ordinaire où le muscle fonctionne à vide. Ce phénomène d'auto-régulation de la puissance par rapport à la résistance qui lui est offerte, dans certaines limites déterminées, est commun à tous les moteurs électriques et s'explique par les réactions de champs. Afin de ne pas surcharger un exposé qui demande déjà, pour être suivi, une sérieuse attention, nous avons préféré reporter au moment où il deviendra indispensable d'y faire appel, c'est-à-dire dans la partie de l'ouvrage consacrée au fonctionnement du nerf, l'étude de tout ce qui se rapporte à l'induction électrique dans la machine animale. Nous demandons

à nos lecteurs de vouloir bien nous faire crédit jusqu'à ce moment.

Temps perdu

L'expérience montre que le début de la secousse ne coïncide pas avec l'instant de l'excitation. Entre celle-ci et la manifestation de ses effets, il s'écoule un temps très court, cependant appréciable, qui a été désigné sous le nom de *temps perdu* ou de *période d'excitation latente*. Cette dernière désignation est tout à fait impropre; seule la première peut convenir à désigner le décalage constaté sur les myogrammes entre l'instant de l'excitation et l'instant où le muscle manifeste sa motilité.

Le phénomène du *temps perdu* s'explique très aisément et apparaît dans la théorie, si l'on trace la courbe des élongations en fonctions du temps. Il suffit de se reporter aux équations fondamentales pour constater que, le diélectrique ne pouvant posséder une élasticité infinie, la courbe des élongations n'a pas son origine au zéro des coordonnées, mais coupe l'axe du temps à un instant positif t_1 .

La valeur de t_1 peut être déterminée géométriquement, sans qu'il soit besoin de faire intervenir le calcul: l'asymptote de $V + V'$ (fig. 20) donne la valeur de la différence de potentiel pour laquelle le muscle revient à sa longueur primitive; elle indique donc aussi, très sensiblement, la valeur de $V + V'$ en dessous de laquelle le muscle ne peut entrer en contraction. Si, du point A d'intersection de la courbe avec son asymptote, nous abaissons la perpendiculaire AB, la distance OB donne la valeur du temps perdu et marque l'origine de la courbe des élongations. Elle correspond à l'instant où il y a égalité entre $V + V'$ et E , c'est-à-dire entre la différence du potentiel aux bornes de l'appareil et la force électromotrice de la source qui l'alimente.

La théorie et l'expérience sont d'accord pour montrer que les différents facteurs (température, fatigue, etc.) qui agissent sur l'amplitude et la durée de la secousse agissent dans le même sens sur la valeur du temps perdu.

Indépendamment du retard d'inscription dû à l'inertie des équipages mobiles des enregistreurs, retard qui tend à augmenter la valeur constatée pour le temps

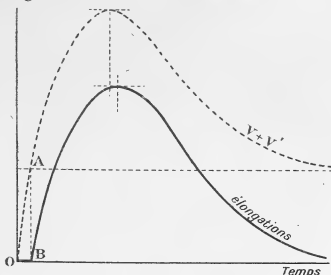


FIG. 20. — Détermination du « temps perdu ».

perdu, ce dernier est plus important lors de la première secousse donnée par un muscle après un assez long temps de repos : la substance élastique du diélectrique est, en quelque sorte « figée » et présente une certaine « résistance au démarrage » qui s'atténue après quelques secousses. Mais c'est là un phénomène d'ordre tout à fait secondaire. Nous retiendrons seulement ceci : le vieillissement des tissus augmente le temps perdu ; cette proposition ressort nettement de tout ce que nous avons dit précédemment.

Constante de temps (Chronaxie)

A la suite d'expériences très ingénieuses, WEISS a constaté que deux facteurs intervenaient pour amener

le muscle *au seuil* de la contraction et que c'était le produit de ces deux grandeurs, — intensité de courant et temps, — c'est-à-dire la *quantité d'électricité* qui, toutes choses égales d'ailleurs, était la seule valeur réellement importante au point de vue de l'excitation. La théorie est tellement d'accord avec ce point particulier, qu'elle l'indique comme une évidence absolue. Ne montre-t-elle pas nettement qu'un courant continu donne une charge au système, puis satisfait aux pertes ohmiques ? Les expériences de WEISS constituent donc une confirmation éclatante de la théorie.

Quant à la manière dont varie cette quantité avec la durée du courant, WEISS l'a formulée sous forme de la loi suivante : « Pour amener un muscle au seuil de l'excitation, il faut que la décharge électrique utilisée mette en jeu une quantité d'électricité constante, plus une quantité supplémentaire variable et proportionnelle à la durée du passage de la décharge. » Cette loi s'exprime par la relation

$$Q = a + bt$$

dans laquelle Q représente la quantité d'électricité qui donne le seuil, t le temps, a la charge constante et b l'intensité du courant donnant lieu à la charge variable. Les quantités a et b ne sont donc pas de simples coefficients et dépendent du muscle sur lequel on opère, de la forme et de la position des électrodes, de la force électromotrice employée, etc.

Le professeur LAPICQUE a mis en évidence que le facteur $\frac{a}{b}$ reste constant pour un muscle donné, à l'état normal. Ce rapport a été dénommé *constante de temps* ou *chronaxie*.

La chronaxie n'est pas autre chose que la constante de temps γR du circuit capacitaire qu'est le muscle. En effet, si nous désignons par γ la capacité de ce

circuit, par R sa résistance ohmique, par I l'intensité du courant de charge et t le temps de charge, et que nous fassions ces substitutions dans l'expression de la loi de WEISS, nous avons d'une part :

$$Q = a + bt = a = b \left(\frac{a}{b} + t \right) \quad (1)$$

et d'autre part :

$$Q = \gamma RI + It = I(\gamma R + t) \quad (2)$$

En identifiant (1) et (2) nous voyons que $\frac{a}{b}$ n'est autre que γR , c'est-à-dire la quantité que ses dimensions rendent homogène à un temps et qui, en électricité,

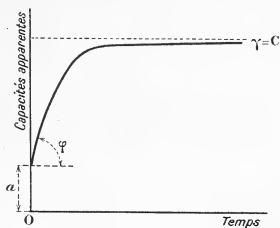


FIG. 21. — Variations de la capacité apparente.

porte le nom de *constante de temps du circuit*, relativement à sa capacité.

Nous avons montré précédemment, dans notre exposé théorique, que γ , *capacité apparente* du système, est loin d'être une constante et que sa valeur varie avec le temps. Au début de l'expérience, elle est :

$$\gamma = \frac{CC'}{C + C'}$$

C et C' représentant ici les capacités respectives du sar-

coplasme et du myoplasme. Pendant les premiers instants de l'expérience, la courbe (fig. 21) se confond très sensiblement avec une droite. Plus loin, elle fléchit et devient asymptotique à l'horizontale $\gamma = C$.

Or, dans les expériences relatées, on n'examine que la portion de la courbe comprise entre l'origine des temps et le seuil de l'excitation, c'est-à-dire dans la période correspondant au « temps perdu ». Dans cette partie, les courbes de différences de potentiel, de capacités et de charges peuvent, sans erreur possible, être confondues avec leurs tangentes à l'origine (fig. 22).

La discussion de la valeur de γR reprise à partir des équations fondamentales antérieurement établies pour-

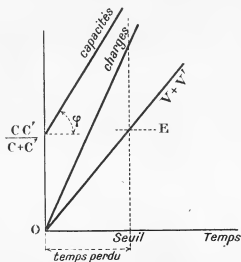


FIG. 22. — Tangentes à l'origine.

rait donner lieu à l'examen de nombreux cas particuliers, selon que le muscle est libre ou non de se contracter, selon que les électrodes occupent telle ou telle position, etc. Nous n'entrerons pas dans ces détails, qui ne nous sont pas utiles pour le moment. Remarquons toutefois que les électrodes impolarisables constituent des capacités susceptibles d'introduire des erreurs dans les mesures.

En résumé, la constante de temps d'un muscle est bien caractéristique du circuit qu'il représente et peut donner d'utiles renseignements globaux sur sa capacité et sa résistance ohmique.

États antérieurs. Hystérésis

Lorsqu'on expérimente sur un muscle, il faut toujours tenir compte de ses états antérieurs immédiats qui, soit par l'effet de température, soit par l'effet d'hystérésis, soit par l'effet de fatigue, influencent la forme des diagrammes enregistrés.

Nous avons vu antérieurement (fig. 19) dans quel sens la température déforme la courbe. Les modifications dues à l'hystérésis peuvent être déterminées au moyen de la courbe donnée précédemment (fig. 10). Nous parlerons de la fatigue dans un chapitre spécial, que mérite cette importante question.

Addition latente. Décharges résiduelles

Le phénomène connu sous le nom d'*addition latente* s'explique très aisément par la théorie. Quand on distribue au muscle une série d'excitations juste suffisantes pour l'amener au seuil de la contraction, cela revient à lui communiquer la charge qui satisfait à sa capacité électrique, ce qui n'amène pas d'effet visible. Toute charge supplémentaire amènera une contraction.

De même, lorsque deux excitations se suivent à intervalles plus ou moins rapprochés, il se produit, selon la fréquence et l'instant d'application, des effets de tétanos ou de modification d'amplitude de la secousse. Toute cette discussion peut être établie graphiquement d'après les figures précédemment présentées (fig. 3, 4, 6, 7, 8 et 20); comme elle ne présente aucune difficulté particulière et montre seulement le parfait accord de la théorie et de l'expérimentation,

nous croyons inutile de lui consacrer d'autres développements.

Ce sont les décharges résiduelles qui, comme nous le savons, peuvent se produire pendant très longtemps, même après mise en court-circuit prolongée, qui fournissent les *courants musculaires* constatés pour la première fois par DU BOYS-REYMOND. Les charges résiduelles ont pour avantage de permettre au muscle d'être toujours plus rapidement prêt à l'action.

Contraction tonique

Le tonus, ou contraction tonique, n'est qu'un cas particulier de la secousse : c'est celui où la courbe de V est nettement au-dessus de celle de V' (fig. 3), c'est-à-dire où le sarcoplasme intervient plus nettement que le myoplasme et, à la limite de cette discussion naturelle à laquelle nous avons déjà fait allusion, la fibre lisse est seule à agir.

Nous savons que la contraction tonique est une contraction puissante et économique : l'expérience l'a prouvé et la théorie l'indique nettement. Toutes choses égales d'ailleurs, la contraction tonique sera d'autant plus brusque que la fibrille striée apparaîtra moins dans la structure du muscle. De deux fibres lisses, celle qui présente la plus grande longueur par rapport à sa largeur, c'est-à-dire celle qui se présente comme un fuseau plus allongé est la plus longue à parvenir au maximum de sa contraction.

La fibre lisse et le sarcoplasme sont des dispositifs du genre « tout ou rien ». Ils sont, en quelque sorte, l'illustration du proverbe : « Il faut qu'une porte soit ouverte ou fermée... » La différenciation des tissus qui a conduit à l'apparition de la fibrille striée a permis à l'appareil musculaire de posséder un mode de réglage sensible, précis et rapide permettant d'entre-bâiller la porte à tous les angles compris entre 0 et π . C'est,

naturellement, au prix d'une dépense d'énergie un peu supérieure, mais il en est de même dans tous les mécanismes, où l'on peut vérifier l'universalité de cette loi : « Tout luxe se paie. » La souplesse d'adaptation, en mécanique, est une dépense somptuaire...

Tout ce que nous venons de dire, et qui ne fait que traduire la théorie en langage ordinaire, nous montre pourquoi le tonus peut être obtenu à partir d'une source de courant continu, alors qu'il n'en est pas ainsi pour le téтанos.

Contraction téтанique

La contraction statique désignée sous le nom de téтанos est bien, comme nous le savons, une contraction dynamique : le travail auquel elle correspond, et qui pourrait être mesuré à l'intégrateur en planimétrant le diagramme du téтанos, est intégralement employé, lorsqu'il n'y a pas de poids soutenu, à satisfaire aux résistances passives du muscle, dont la principale est une résistance ohmique non négligeable. L'effet d'hystérésis agit dans le même sens, mais a peu d'importance par rapport à la calorification par effet Joule. Nous y reviendrons ultérieurement.

Le téтанos est le résultat de la fusion plus ou moins parfaite d'une série de secousses. Lorsque les courants cycloïdaux qui l'entretiennent sont à trop longue période ou, ce qui revient au même, de trop basse fréquence, le diagramme présente une série de dentelures. A une fréquence suffisante, il donne un trait horizontal ou *plateau* (fig. 23), parce qu'à ce moment l'inertie de l'enregistreur ne lui permet plus de s'adapter au rythme vibratoire de l'appareil musculaire.

L'épreuve au son, imaginée par HELMOLTZ, permet de suivre jusqu'à ses extrêmes limites la cadence du muscle en action. Si cette cadence n'est pas très élevée chez l'homme et les mammifères, elle peut atteindre à

dès chiffres beaucoup plus importants chez les insectes ; il y a, en effet, un rapport constant, toutes choses égales d'ailleurs, entre l'inertie d'un système et le rythme vibratoire maximum qu'il peut prendre. Il en résulte que la fréquence nécessaire à l'obtention du tétanos est, comme le temps perdu ou comme la constante de temps, une des caractéristiques essentielles d'un muscle donné.

Tous les facteurs qui agissent sur l'amplitude et la durée de la secousse agissent donc dans le même sens

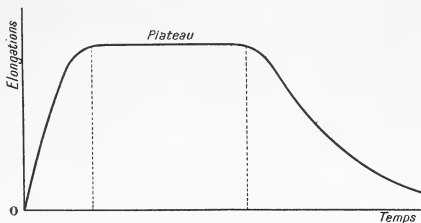


FIG. 23. — Tétanos parfait.

sur la contraction tétanique. La plus frappante illustration de ce fait réside dans le tremblement sénile ou dans le tremblement prématuré consécutif à la dépression qui suit l'absorption d'excitants. La fatigue qui suit les exercices violents est susceptible, également, de créer un état assez prolongé durant lequel s'opère imparfaitement la fusion des secousses : c'est ainsi qu'il est à peu près impossible de dessiner convenablement lorsqu'on quitte une séance de gymnastique et que, dans un programme rationnel d'enseignement, on ne doit pas placer une séance d'épure directement derrière une leçon d'escrime !

Le tétanos peut, en laboratoire, s'obtenir à partir des

courants variables les plus divers, depuis les courants alternatifs simples jusqu'à ceux fournis par les bobines d'induction, en passant par les courants intermittents dits « courants de LEDUC ». Ces derniers, seuls, se rapprochent de la réalité et peuvent être amenés à posséder la même valeur et la même forme que les courants engendrés par l'animal vivant.

Il est évident que le seul moyen de satisfaire à une augmentation de charge pesante, opposée à l'action d'un muscle, est d'augmenter la fréquence des courants qui l'alimentent. Cette augmentation de fréquence entraîne évidemment avec elle une augmentation de dépense d'énergie. La limite de charge pesante est donnée par la limite de charge électrique correspondant au sommet de la courbe représentative de $V + V$.

Onde musculaire

L'onde d'ÆBY, phénomène artificiel, n'a guère d'autre intérêt que celui de nous fournir, s'il en était besoin, une nouvelle preuve de l'exactitude de la théorie que nous développons ici.

Lorsque, ultérieurement, nous démontrerons que le fonctionnement du nerf est, dans son principe, identique à celui du fonctionnement du muscle, nous serons amenés à comprendre l'analogie qui existe entre l'onde d'ÆBY et la propagation de l'influx nerveux : dans un cas comme dans l'autre, mais avec des dispositifs différents, il ne s'agit que du cheminement d'un courant électrique, par influence, à travers des capacités disposées en cascade. Ce déplacement ne peut, naturellement, atteindre la vitesse des ondes électromagnétiques dans l'éther, et l'on voit combien est fragile le raisonnement, si néfaste au progrès de la science physiologique, en vertu duquel l'influx nerveux n'est pas de nature électrique parce qu'il ne parcourt pas 300 000 kilomètres par seconde ! Les télégrammes envoyés par câble de

Paris à New-York n'atteignent pas non plus cette vitesse, mais les ingénieurs ont bien été obligés de connaître les effets de la constante de temps d'un circuit le jour où elle a commencé à se mettre sérieusement en travers de leurs projets...

L'onde d'ÆBY possède une vitesse qui est caractéristique de la structure du muscle expérimenté et les indications qu'elle donne sont en liaison étroite avec celles fournies par la mesure de la constante de temps. Comme elle ne peut être expérimentée que sur un muscle préparé, elle constitue une méthode inférieure à celle employée pour l'établissement de la valeur de la chronaxie.

L'onde élémentaire est un phénomène que certains auteurs veulent absolument distinguer de l'onde d'ÆBY. Il est inutile, croyons-nous, de couper les cheveux en quatre : les deux phénomènes sont rigoureusement de même nature au point de vue électrique.

Force portante

La force portante théorique du condensateur à diélectrique perméable et élastique a été précédemment établie. Cette formule est une simple généralisation de celle donnée par lord KELVIN pour l'électromètre absolu.

En appliquant la formule simplifiée, largement suffisante pour l'application que nous voulons faire ici :

$$F = 0,442 \text{ K. } 10^{-6} \frac{S}{a^2} V^2$$

qui donne F en dynes si s est exprimé en centimètres carrés, V en volts et a en centimètres, un calcul approché se rapportant à un muscle strié équivalent à un biceps moyen, montre que l'ensemble des fibrilles striées ne peut guère porter qu'un poids de 100 à 150 grammes.

La fonction portante appartient donc au sarcoplasme.

Nous n'avons malheureusement pas de chiffre exact concernant la distance qui sépare, dans cette partie du muscle, les corpuscules électrisés. Provisoirement la force portante d'un muscle devra donc s'exprimer par des formules empiriques. La formule théorique a eu, du moins, cette utilité de confirmer certaines expériences de IOTEYKO sur la fatigue, expériences qui concluent que la puissance d'un muscle réside dans le sarcoplasme.

Contraction cinématique

Nous entendons par contraction cinématique celle où le muscle se contracte, non pas seulement à vide comme dans l'expérience ordinaire de la secousse, mais pour vaincre une résistance dont le point d'application, contrairement à ce qui a lieu dans la contraction statique, est susceptible de se déplacer. C'est le mode de travail le plus ordinaire du muscle.

Si, pendant un temps durant de T_0 à T_1 , le muscle

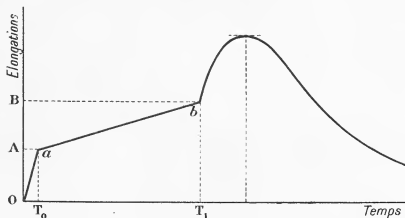


FIG. 24. — Contraction dynamique (cycle fermé).

isolé a à vaincre une résistance extérieure, par exemple l'élévation d'un poids à une hauteur AB, le diagramme enregistré (fig. 24) va se trouver modifié. Si la fréquence est suffisante, la portion *ab* de la courbe sera une droite. Si la fréquence est insuffisante, l'ascension

ne pourra s'effectuer que par une série de secousses qui donneront à cette partie de la courbe une allure dentelée.

La portion ab de la courbe est analogue à ce qu'on appelle en physiologie un *plateau ascendant*. L'aire du quadrilatère abT_0T_1 mesure le travail effectué pendant le soulèvement du poids.

La discussion des cas multiples pouvant se produire dans la contraction cinématique sera donnée, ultérieurement, dans ses grandes lignes, lorsque nous étudierons la puissance, le travail et le rendement de l'appareil musculaire.

Amplitude et fréquence

Les observateurs ont remarqué que l'amplitude de la secousse était indépendante de la fréquence des excitations. La théorie confirme ce fait : pour un même appareil musculaire et en dehors de toute cause secondaire telle que l'addition d'un poids, la fatigue, une modification de température ou les états antérieurs du muscle, le maximum de l'amplitude dépend seulement du potentiel de charge.

Variation de température

Dans la croyance que le muscle était un appareil thermique, il a été fait un nombre considérable d'observations thermométriques et calorimétriques dans les laboratoires. Mais à vouloir, de toute force, faire servir les faits expérimentaux à l'établissement d'une théorie thermodynamique, on a souvent abouti à des conclusions qui n'avaient aucun rapport avec les réalités.

La chaleur qui apparaît dans le muscle pendant et après son fonctionnement est une chaleur purement excrémentitielle ; c'est le déchet obligatoire qu'entraîne le travail des résistances passives de l'appareil, résis-

tances que les exposés précédents nous ont fait connaître.

Les diagrammes d'élévation de température relevés par RICHET suivent exactement la loi de variation de température d'un corps auquel on fournit des quantités de chaleur égales pendant des temps égaux et qui est refroidi par rayonnement et conduction. Cette loi, qui est indépendante de la manière dont la chaleur est apparue, est facile à établir.

Soient : θ la température du corps à un instant donné, $d\theta$ l'élévation de température en un temps dt , C la chaleur spécifique du corps, M sa masse, P la puissance transformée en chaleur et J l'équivalent mécanique de la calorie.

On a : $W = Pdt$ et Q étant la quantité de chaleur correspondante

$$Q = \frac{Pdt}{J} \text{ ou } Q = MCd\theta_1.$$

D'où :

$$\frac{d\theta_1}{dt} = \frac{P}{JMC}$$

Donc, si l'on protège le corps contre toute cause de refroidissement, l'élévation de sa température sera représentée par une droite de coefficient angulaire

$\frac{P}{JMC}$ et d'équation :

$$\theta = \frac{JMC}{Pt} + \tau$$

τ étant la température initiale du corps.

Pour avoir le refroidissement par le milieu ambiant, il nous suffit d'appliquer la loi de Newton. L'abaissement de température $d\theta_2$ dans le temps dt est :

$$d\theta_2 = m(\theta - \tau) dt$$

m représentant le facteur de forme du corps.

La variation résultante de température sera :

$$d\theta_1 - d\theta_2 = d\theta = \frac{JMC}{P} \frac{d\theta}{dt} - m(\theta - \tau) dt$$

que nous pourrons écrire sous forme de l'équation différentielle :

$$\frac{d\theta}{dt} + m\theta = \frac{P}{JMC} + m\tau.$$

En posant le second membre de cette équation égal à A on obtient par intégration :

$$\theta = \Gamma e^{-mt} + \frac{A}{m}$$

Γ étant la constante d'intégration. Pour la déterminer, il nous suffit de remarquer que pour $t = 0$ on a nécessairement $\theta = \tau$. Donc :

$$\theta = \tau e^{-mt} + \frac{A}{m} \quad (1)$$

On verrait facilement à la discussion de cette courbe qu'elle admet une asymptote parallèle à l'axe des temps, donc que la température finale a une limite, qu'on obtient facilement par cette remarque que, lorsque la température finale est atteinte, il y a équilibre entre la chaleur apparue et celle qui est absorbée par le milieu ambiant. C'est-à-dire :

$$m(\theta - \tau) = \frac{P}{JMC}.$$

D'où :

$$\theta = \frac{P}{mJMC} + \tau$$

On arriverait au même résultat en faisant $t = \infty$ dans l'équation (1). Pour que le problème soit complètement traité, il nous faut, en plus, supposer le corps refroidi par un courant liquide intérieur, le mélange étant considéré comme intime.

Si M' est la masse de liquide renouvelée dans l'unité de temps, C' la chaleur spécifique du liquide, T la température initiale, supposée constante, du liquide, T_1 la température du liquide après un temps dt , la variation $d\theta_3$ de température du corps en un temps dt , du fait du mélange, sera :

$$M'C'(T_1 + T).$$

Celle du liquide sera :

$$MC d\theta_3.$$

Évidemment :

$$MC d\theta_3 = M'C'(T_1 - T).$$

Donc, et en tenant compte des résultats précédemment établis, la variation totale de température du corps sera :

$$d\theta = -\tau me^{-mt} dt - \frac{M'C'}{MC} (T_1 - T).$$

D'où :

$$\theta = \tau e^{-mt} - \int \frac{M'C'}{MC} (T_1 - T) + C^{te}.$$

Mais si v est la vitesse par seconde du liquide et s la section de la nappe liquide, on a :

$$M' = v s dt.$$

En posant :

$$\frac{v s C'}{MC} = K$$

on en déduit :

$$\theta = \tau e^{-mt} - K (T_1 - T) t + C^{te}.$$

La constante peut se déterminer par cette remarque que pour $t = 0$, on a $\theta = \tau$. Donc $C = 0$. Finalement :

$$\theta = \tau e^{-mt} - K (T_1 - T) t \quad (2)$$

Si, en particulier, on suppose que $\tau = \theta$, c'est-à-dire

que le liquide, après avoir baigné le corps, sort à la température de celui-ci, on a :

$$\theta = \frac{\tau e^{-mt} + K T t}{1 + K t} \quad (3)$$

Pour $t = 0$, on a $\theta = \tau$; pour $t = \infty$ on a $\theta = \frac{KT - m\tau}{K}$ ce qui détermine l'asymptote de la courbe (fig. 25).

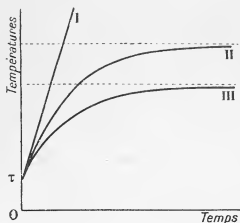


FIG. 25. — Loi de l'échauffement.

Comme cas encore plus particulier, on peut faire $T = \tau$, ce qui donne, pour $t = \infty$,

$$\theta = \left(1 - \frac{m}{K}\right) \tau = \tau \left(1 - \frac{m MC}{v s C''}\right) \quad (4)$$

La loi d'échauffement du muscle, en conséquence du travail qu'il accomplit, est celle que nous venons d'indiquer si l'on se place dans le cas singulier, qui est en général celui de l'expérimentation, où le muscle accomplit des travaux égaux dans des temps égaux. Dans ce cas, en effet, la chaleur qui apparaît est due au travail des forces électriques dans le diélectrique, aux pertes par résistance ohmique et par hystérésis. Le travail de compression du diélectrique n'intervient que dans le cas de contraction statique ou pour un cycle de

travail non fermé ; dans le cas d'un cycle fermé, il n'entre pas en jeu, le travail de détente étant égal et de signe contraire au travail de compression. Il est à peine besoin de dire que, de tous ces effets calorifiques, celui qui est de beaucoup le plus important est l'effet JOULE dû à la résistance ohmique non négligeable du diélectrique.

Mais, tandis que le muscle s'échauffe par suite du travail accompli, il est régulièrement refroidi par une

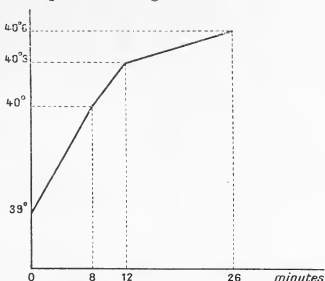


FIG. 26. — Courbe de température relevée par RICHET (excitation électrique artificielle).

déperdition de chaleur à travers les tissus environnants et par l'irrigation constante que lui assure la circulation sanguine. La peau est un assez mauvais conducteur de l'électricité, sa résistance étant de l'ordre du mégohm ; elle est donc également un mauvais conducteur de la chaleur, en vertu d'une loi bien connue ; le refroidissement du muscle par les tissus environnants et par la peau, à moins qu'il ne soit activé par la sudation, est donc très peu important par rapport à celui qu'assure le flux sanguin. Ce dernier joue d'autant mieux son rôle régulateur de température qu'il est, comme nous

savons, le liquide de la pile alimentant le muscle en électricité et que cette pile est à fonctionnement endothermique. La quantité de chaleur qu'elle absorbe est assez forte pour couvrir complètement la chaleur dégagée par le muscle pendant une période importante du

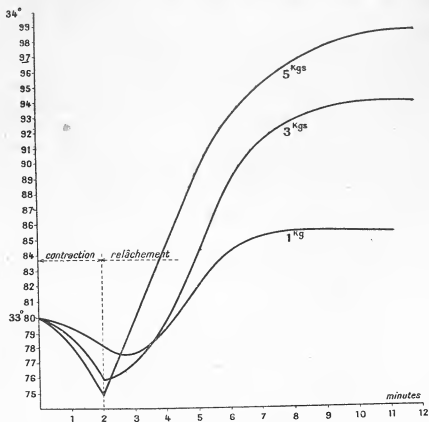


FIG. 27. — Courbes de température relevées par CHAUVÉAU sur le biceps (excitation naturelle) portant 1, 3 et 5 kgs.

début du travail musculaire. Les courbes (fig. 27) que nous avons établies d'après un tableau donné par CHAUVÉAU comme résultat d'une série d'expériences, et que nous avons ramenées à une même température de départ, sont particulièrement instructives.

Température optima

La résistance électrique des isolants diminuant

lorsque leur température s'élève, les intensités de charge augmentent corrélativement. Le muscle échauffé consomme donc plus d'énergie électrique que le muscle relativement froid; en contre-partie, sa puissance s'en trouve améliorée. Il y a donc une *température optima* de fonctionnement de l'appareil musculaire, température que tendent toujours à rétablir les animaux homéothermes.

Il est curieux de rapprocher ce fait de celui qui a été établi par RENNESSON dans ses recherches sur les pertes à travers les diélectriques dans les câbles industriels soumis à des tensions alternatives, et qui montre que, pour les fréquences inférieures à 100 par seconde, les pertes présentent un minimum très accusé aux environs de 30°, où elles sont moitié moindres qu'à 12 ou 55 degrés, comme nous l'avons déjà signalé au début de notre étude.

LA FATIGUE

La fatigue est un des phénomènes qui ont été le plus minutieusement étudiés par les expérimentateurs et il semblerait qu'il n'y ait plus rien à dire sur un tel sujet. On va voir pourquoi nous avons cru utile de lui consacrer un chapitre de cet ouvrage, en nous limitant cependant à l'examen des *origines* de la fatigue dans le seul appareil musculaire, sans aucunement pénétrer sur le terrain de la physiologie générale.

La fatigue est un phénomène apparemment complexe et, pour en discuter utilement, il est nécessaire d'en discriminer les facteurs essentiels. Mais, auparavant, il convient de bien se mettre d'accord sur le sens accordé au mot lui-même.

LITTRÉ définit ainsi la fatigue : « Sentiment douloureux, avec difficulté d'agir, que cause un travail excessif ou trop prolongé. » Tout le monde, pour avoir plus ou moins éprouvé les effets de la fatigue, sait qu'il arrive un moment où elle est plus forte que toute volonté antagoniste et où tout travail supplémentaire devient impossible. Ce dernier état est celui de la fatigue incoercible et il nous donne l'intuition que, s'il nous faut traduire mathématiquement les valeurs de la fatigue en fonction du temps de travail, la courbe qui les réunira en un tracé continu tendra vers l'infini.

Au sens mécanique, la fatigue est le phénomène qui fait qu'au bout d'un certain temps de fonctionnement normal, c'est-à-dire en dehors de toute cause accidentelle, la machine est obligée de s'arrêter. Prenons

quelques exemples, et ordonnons-les du plus simple vers les plus complexes :

1° Une voiture qui marche sur sa lancée, sur une route en palier, finit par s'immobiliser. Ceci arrive lorsque toute la puissance vive qu'elle possédait et qui, dans le cas présent, était son unique source d'énergie de déplacement, a été usée par le travail des différentes résistances passives qu'elle a eu à vaincre : résistance au roulement, résistance de l'air, frottements des fusées, etc. Ces diverses énergies se sont toutes résolues en chaleur dissipée dans le milieu ambiant en laissant comme trace l'usure des bandages, celle des roulements, celle même de la carrosserie.

2° Une roue de moulin débrayée et alimentée par un déversoir de capacité limitée s'arrête lorsque le niveau atteint par l'eau dans ce déversoir est tel, par rapport au niveau d'écoulement des eaux usées, que la hauteur de chute est insuffisante à vaincre les résistances passives de la roue hydraulique.

3° Un moteur électrique alimenté par une batterie de piles s'arrête lorsque la force électromotrice de la batterie descend au-dessous d'une certaine valeur, c'est-à-dire lorsque la puissance fournie par la batterie au moteur est insuffisante pour équilibrer la puissance totale nécessaire à vaincre les résistances extérieures opposées au moteur, ainsi que ses résistances intérieures de fonctionnement.

Cet exposé va nous permettre d'élucider la nature des principaux facteurs qui concourent à faire apparaître l'état de la fatigue d'une machine.

Un moteur, avons-nous dit précédemment, est un transformateur d'énergie comportant essentiellement : un appareil d'utilisation de cette énergie, une source fournissant cette énergie et des organes annexes destinés à assurer le bon fonctionnement de la machine tout entière. L'arrêt normal du moteur peut survenir

par état de fatigue incoercible survenant dans un des trois groupes d'organes, sans qu'il soit aucunement nécessaire que tous trois soient atteints à la fois.

Si donc nous voulons déterminer la cause de fatigue d'une machine, nous serons amenés à rechercher l'organe qui a causé l'arrêt de l'ensemble. Mais toujours,

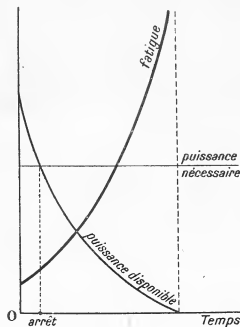


FIG. 28. — Courbes de fatigue (hyperbole).

nous serons conduits vers cette constatation que *l'arrêt est survenu en suite d'une rupture d'équilibre entre la puissance nécessaire à accomplir le travail et la puissance disponible pour accomplir ce même travail*. Si la source est à capacité limitée, — comme un accumulateur qui se vide, un tas de charbon qui s'épuise ou un réservoir qu'on n'emplit pas à nouveau, — le rapport de la puissance nécessaire à la puissance disponible, établi à chaque instant, nous montrera quelle est la loi qui entraîne inéluctablement la machine vers son arrêt et déterminera le moment où il surviendra. Cette loi est hyperbolique (fig. 28).

En somme, le cas le plus naturel d'apparition de la fatigue, dans une machine ordinaire, est l'épuisement de la source d'énergie, comme nous le montre le premier cas examiné, ou bien l'abaissement du potentiel de la source au-dessous de l'actualisation nécessitée par les résistances passives, comme dans le second cas. Le troisième cas est un peu plus complexe : l'arrêt survient soit parce que la batterie est déchargée, soit parce qu'une force contre-électromotrice intérieure a polarisé ses éléments. Ce dernier cas, qui nous rapproche davantage de la marche des machines animales, est, de beaucoup, le plus intéressant, car il fait apparaître la notion du *trouble fonctionnel*.

La fatigue simple, c'est-à-dire la fatigue par épuisement des réserves d'énergie, peut avoir sa loi modifiée par des causes accélératrices ou par des causes retardatrices : fuite d'un réservoir, court-circuit intérieur d'un accumulateur dans la première supposition ; mise en service d'un réservoir de secours ou recharge partielle des éléments, dans la seconde supposition. Mais cela ne changera pas grand'chose à l'allure générale de la courbe de fatigue.

L'inverse de la fatigue est l'endurance. On pourra donc, au lieu de la courbe de fatigue, tracer la courbe d'endurance et en tirer des indications du même ordre.

Si nous examinons maintenant le cas d'une machine alimentée par une source d'énergie qui ne s'épuise pas, cette machine ne pourra s'arrêter que par suite de troubles fonctionnels, d'accident ou d'usure. On peut donc dire qu'une telle machine ne se fatigue pas et qu'en définitive il n'y a de vraie fatigue que celle provenant de l'épuisement de la source. Le trouble fonctionnel, l'accident et l'usure ne sont que des « prolongements » de la fatigue. Ainsi, si l'on met en service continu un moteur électrique de construction peu robuste et établi seulement pour un travail intermit-

tent, il peut arriver que ses isolants chauffent au point qu'on soit obligé d'arrêter le moteur pour empêcher sa destruction ou que, si on ne l'arrête point, les isolants s'amollissent, brûlent et mettent l'appareil hors service. Le trouble fonctionnel non surveillé conduit à l'usure prématurée du mécanisme.

La machine va donc vers sa fin en passant par des stades successifs qui s'appellent fatigue, trouble fonctionnel, puis, en bifurquant vers l'un ou vers l'autre, accident ou usure. *Plus nous approchons du terme ultime de la série, moins facilement le mal est réparable.* Pour cette raison, nous limiterons d'abord l'étude de la fatigue à celle des phénomènes consécutifs à l'affaiblissement momentané de la source d'énergie. Nous disons « affaiblissement » et non « épuisement », car, dans le cas qui nous préoccupe, l'affaiblissement amène des résultats visibles avant que l'épuisement ne soit atteint, ainsi que nous l'avons vu dans les deuxième et troisième cas précédemment cités. -

Fatigue de la source d'énergie

Nous avons émis cette théorie que l'énergie électrique consommée par l'appareil musculaire provenait d'une sorte de pile où le glycogène, d'un côté, l'hémoglobine, de l'autre, jouaient un rôle primordial. Or, le glycogène est amené dans le muscle par le sang et y constitue le dépôt provisionnel nécessaire à l'entretien de la force électromotrice de la pile. L'animal puise, au fur et à mesure de ses besoins, dans ce magasin d'énergie potentielle, et il use, en quelques instants, une quantité de matière qu'il a fallu un temps beaucoup plus long pour y apporter. Il est évident que si le dépôt se vide plus vite qu'il ne se remplit, la fatigue, telle que nous l'avons définie, ne va pas tarder à manifester ses effets.

D'autre part, comme tous les autres éléments hydro-

électriques, la pile animale se polarise par suite de dégagement d'hydrogène au pôle positif ou de la formation de corps plus riches en hydrogène, qui « encrassent » la pile et arrêteraient même son fonctionnement si le sang, par son apport d'oxygène, ne procédait à une dépolarisation régulière. Quoique, lorsque l'animal se fatigue, le rythme circulatoire s'accélère, il peut arriver que la dépolarisation ne

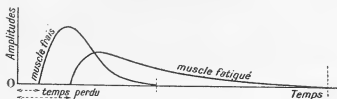


FIG. 29. — Effet de la fatigue sur la secousse musculaire.

s'opère pas assez vite pour que la force contre-électromotrice soit vraiment négligeable.

Les deux effets vont donc s'additionner en un effet général d'affaiblissement de la source, qui va suivre une loi identique à celle qu'on a constatée sur les piles ordinaires.

Si l'on se rappelle que la polarisation des piles est définie, en électricité, comme la résultante de deux effets :

1° Apparition d'une force contre-électromotrice par production d'hydrogène, qui se porte au pôle positif ;

2° Augmentation de la résistance intérieure de l'élément par modification d'une ou de plusieurs des substances qui le composent et qui ont pour effet de changer la nature de l'action chimique, et si, d'autre part, on veut bien se reporter aux équations fondamentales qui traduisent le fonctionnement du condensateur shunté, on voit immédiatement dans quel sens agit la polarisation : la durée t de la secousse s'allonge quand R , résistance intérieure de la pile, s'accroît. La théorie,

sur ce point encore, continue donc à rester en parfait accord avec les constatations expérimentales : l'effet de la fatigue est une augmentation du « temps perdu » et un allongement de la secousse corrélatif à une diminution d'amplitude (fig. 29) ; le travail de la secousse est augmenté et, en planimétrant les deux courbes, on

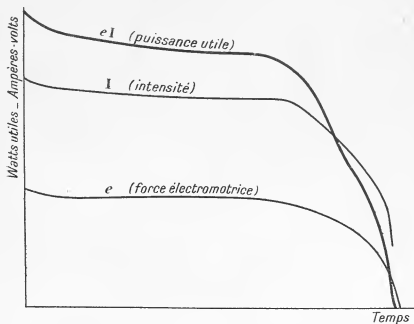


FIG. 30. — Courbes de la polarisation.

s'apercevrait que la seconde possède une aire plus élevée que la première : il faut en voir la raison dans ce fait que l'élévation de température du diélectrique diminue sa résistance électrique et, par suite, augmente la consommation de courant.

Depuis fort longtemps, les électriciens ont fait l'étude de la décharge des piles ou des accumulateurs, et ils ont établi des courbes où la marche de ce phénomène est exprimée en fonction du temps. Nous en reproduisons quelques-unes (fig. 30) d'après HOSPITALIER. Leur identité d'allure avec les ergogrammes ou « courbes de fatigue » établis par Mosso, puis par

IOTEYKO (fig. 31 et 32) est extrêmement frappante, mais non surprenante : les ergogrammes enregistrent des amplitudes de secousses en fonction du temps ; ces amplitudes diminuent quand R s'accroît, en suivant

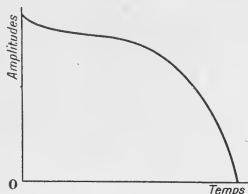


FIG. 31. — Fatigue 1^{er} type (D^r Abucco).

une loi parallèle à celle, retracée sur la figure 30, de l'affaiblissement de la source.

Si certains diagrammes enregistrés tendent à s'éloigner de cette forme typique, il faut, croyons-

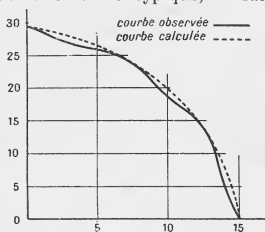


FIG. 32. — Fatigue (observation IOTEYKO).

nous, en voir la raison dans l'influence de facteurs secondaires, tels que la volonté ou certaines réactions nerveuses inconscientes, impossibles à éliminer complètement dans des expériences aussi délicates.

Ergogramme de Kronecker

L'ergogramme de KRONECKER, établi sur le gastroc-némien de la grenouille, à partir d'excitations électriques provenant d'une source extérieure, est une ligne droite. Ce fait n'est aucunement en désaccord avec la théorie : la résistance intérieure de la source auxiliaire n'ayant pas varié pendant la durée de l'expérience, la fatigue n'est due ici qu'à la variation de r' , résistance ohmique du myoplasme, sous l'influence des excitations qui produisent des effets chimiques d'ordre secondaire, de grandeur proportionnelle au nombre des excitations. Il n'y a là qu'un phénomène un peu artificiel, confirmant cependant la théorie.

Courbes d'endurance

Des considérations précédentes, nous sommes autorisés à conclure, en restant dans la limite des restrictions établies au début de ce chapitre, que *c'est bien la fatigue de la source d'électricité qui est la cause primordiale de la fatigue du muscle*. Celui-ci nous apparaît donc comme obéissant aux mêmes lois que tous les mécanismes artificiels réalisés par le génie humain. De même que dans une sonnerie électrique c'est la pile et non le mécanisme du timbre qui se fatigue le plus vite, de même, dans la machine animale, c'est le couple hydroélectrique qui s'affaiblit bien avant la fibrille musculaire.

Qu'on veuille bien nous permettre ici une légère observation : le graphique obtenu en reliant d'un tracé continu les sommets d'un ergogramme n'est pas une « courbe de fatigue », mais bien une « courbe d'endurance ». Le tracé n'est, en effet, pas représentatif de la fatigue, au sens strictement analytique : les ordonnées de la courbe sont figuratives des puissances disponibles à chaque instant de l'expérience et marquent l'inverse

de la fatigue. Etablir la vraie courbe de fatigue d'après la courbe d'endurance est une opération qui ne présente, d'ailleurs, aucune difficulté. Il serait heureux, croyons-nous, que le langage de la physiologie renonçât à une expression erronée, susceptible d'entraîner à sa suite de fausses interprétations.

Equation Ioteyko-Henry

IOTEYKO et Ch. HENRY ont posé, en représentation des courbes ergographiques ou courbes d'endurance, l'équation suivante, parabole du 3^e degré :

$$\eta = H - at^3 + bt^2 - ct$$

où η est l'amplitude de la contraction à chaque instant de l'expérience, H l'amplitude initiale, a , b , c , des paramètres appropriés aux conditions de l'expérience.

Cette équation est d'ordre plus général que celle pouvant être établie d'après les vues simplifiées auxquelles nous nous sommes tenus. Il est cependant curieux de rapprocher le tracé, donné par les auteurs, des trois paramètres de la courbe, du tracé que nous avons donné antérieurement (fig. 28) des composantes de la fatigue. Les deux théories, quoique ayant des points de départ assez différents, ne sont pas éloignées de se rejoindre, surtout si l'on tient compte de la remarque ci-après.

Intensités de charge

Il ressort de la théorie que l'intensité de charge de l'appareil musculaire, à un moment quelconque, est proportionnelle à la force électromotrice de la source. Toutes choses égales d'ailleurs, une variation de la force électromotrice donnant une variation proportionnelle de l'intensité ne doit donc pas avoir d'influence sur l'isolement.

Or, lorsque la pile se polarise, sa résistance intérieure augmente. Il convient donc d'établir la fonction qui relie l'intensité de charge à cette résistance intérieure variable R . Pour éviter de reproduire ici une longue suite de calculs, nous nous contenterons de donner

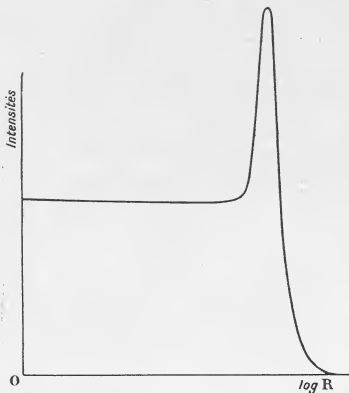


FIG. 33. — Intensités de charge en fonction de la résistance du circuit de charge.

(fig. 33) la représentation graphique de la fonction qui relie l'intensité de charge, à un certain temps t , à la résistance du circuit de charge : piles et conducteurs. Pour bien accentuer les variations des ordonnées, les abscisses représentent les logarithmes de R . La courbe est analogue à celle due aux variations de r' . L'intensité de charge au temps t qui, contrairement à ce qui aurait lieu pour un condensateur unique à diélectrique homogène, n'est pas nulle pour $R = 0$, augmente en même

temps que la résistance R . L'augmentation, d'abord très lente, subit brusquement une accélération; la courbe atteint ensuite un maximum et décroît enfin rapidement jusqu'à 0 pour $R = \infty$. La partie caractérisée par une rapide élévation de la courbe est celle où la valeur de R tend à égaler celle de r' .

Troubles fonctionnels du récepteur. Contracture

La distinction que nous avons été amenés à établir entre les appareils d'utilisation, ou appareils récepteurs, et la source d'énergie, est d'ordre théorique et n'a été faite que pour faciliter notre étude. Mais, dans le dispositif musculaire, la source et le récepteur sont intimement réunis l'un à l'autre ce qui rend les expériences très difficiles si l'on veut dissocier nettement les phénomènes.

Nous avons vu que le récepteur cesse de fonctionner si l'énergie qui l'alimente vient à faire défaut ou est interceptée. Il s'arrêtera également, comme nous savons, si les transformations que sa marche amène dans son état physique — par exemple, l'échauffement exagéré de pièces essentielles — met le récepteur hors d'état d'utiliser l'énergie qui lui est fournie. Ce n'est plus là de la fatigue, au vrai sens du mot, mais un trouble fonctionnel, parce qu'une machine doit être établie en vue du travail qu'elle a à fournir. Ses défaillances sont imputables, ou au constructeur qui en a mal calculé les éléments, ou à l'usager qui soumet le mécanisme à des efforts pour lesquels il n'était pas fait.

Un travers bien humain veut que l'usager accuse toujours le constructeur...

La fatigue apparaît après un travail généralement prolongé à l'exagération. Que se passe-t-il dans le muscle? L'échauffement qui va toujours en augmentant diminue progressivement la résistance ohmique r' du diélectrique. Or, le myoplasme n'est qu'un appareil de

réglage, avons-nous dit, et il n'est pas fait pour un travail prolongé, qui l'échauffe et amène infailliblement un trouble fonctionnel qui vient s'ajouter à l'effet de fatigue.

La chaleur engendrée dans le myoplasme quand r' diminue conduit cet organe vers le rôle de calorifère électrique qui réchauffe le sarcoplasme, augmente les actions répulsives des corpuscules de ce dernier et oblige ses fibrilles à se distendre exagérément. Le sentiment de malaise qui en résulte vient de ce que la machine est contrainte, subitement, de travailler au-dessus du taux pour lequel elle était calculée. C'est le phénomène de la *contracture*.

Nous avons dit, dans nos considérations générales, que tout travail laissait après lui chaleur et trace. La trace que la crampe laisse après elle, et qui s'imprime dans les tissus, cause une propension à ce que la même cause reproduise le même effet ; mais le second phénomène apparaîtra avec une avance systématique par rapport au premier. Le terrain est préparé, l'orientation est donnée, le trouble tend à s'amorcer plus vite, la crampe professionnelle s'installe sournoisement...

Ce processus, qui se retrouve à la base de toutes les évolutions de l'être vivant, ne lui est pas particulier : il est commun à toutes les machines, sans exception, et, comme nous serons amené à le démontrer ultérieurement dans cet ouvrage, ses effets s'accroissent comme les carrés des temps.

Rythme fonctionnel

Comme toutes les autres machines, la machine musculaire possède son système approvisionneur d'énergie et son système régulateur de marche. Et le sang joue ici un rôle capital :

1° Il est la « terre » électrique à laquelle est reliée une des deux électrodes de la pile génératrice ;

2° Ses éléments, sérum et hémoglobine, constituent l'un des deux groupes de substances dont l'ensemble donne au couple hydroélectrique sa force électromotrice ;

3° L'oxygène de l'oxyhémoglobine dépolarise la pile et l'hémoglobine entraîne l'anhydride carbonique au poumon où elle se régénère à l'état primitif d'oxyhémoglobine ;

4° Le sang emporte également vers le poumon les molécules d'eau qui se sont formées pendant le fonctionnement de la pile ;

5° Le sang apporte à la matière musculaire la matière nécessaire à son réapprovisionnement en glycogène ;

6° Le sang, par son liquide circulant, concourt puissamment au refroidissement de l'appareil échauffé par son propre fonctionnement et se débarrasse au poumon, qui joue le rôle de radiateur, de l'excédent de chaleur qu'il a entraîné.

Le sang est donc le liquide vital, approvisionneur et régulateur de la fonction musculaire. Mais, comme tous les dispositifs approvisionneurs ou régulateurs, il demeure sous le contrôle étroit de ce facteur essentiel : le temps.

La fatigue apparaîtra d'autant plus vite et sera d'autant plus profonde, le vieillissement du dispositif musculaire conservera des traces d'autant plus rapidement apparues et d'autant plus ineffaçables, que le désaccord sera plus grand entre le rythme musculaire et le rythme sanguin ; si celui-là cherche à dépasser celui-ci, l'usure prend le dessus sur la réparation. La fatigue entraîne à sa suite le trouble fonctionnel, avant-coureur de la mort du mécanisme.

Nous croyons avoir suffisamment montré combien, dans toutes ses conséquences, la théorie demeure parfaitement d'accord avec les faits observés, pour qu'il

soit utile que nous insistions sur un sujet dont les développements physiologiques ont été magistralement traités par ailleurs, et d'une manière qui nous interdit toute incursion injustifiée sur un domaine qui n'est point le nôtre.

TRAVAIL. PUISSANCE. RENDEMENT

Tout ce qui concerne la mécanique proprement dite du muscle squelettique, les leviers osseux qu'il fait mouvoir et l'antagoniste qui se met en action de manière à réaliser un réglage différentiel extrêmement nuancé de tous les mouvements possibles du mécanisme, tout cela a été trop minutieusement décrit par ailleurs pour que nous nous croyions autorisé à revenir sur un tel sujet.

Avant de dire quelques mots du travail et de la puissance de l'appareil musculaire, il est cependant nécessaire que nous complétions notre exposé théorique par une indication pratique qu'il est impossible de négliger. Pour mesurer le travail d'un muscle on opère, soit sur un muscle mort isolé, comme le gastrocnémien de la grenouille, soit sur un muscle vivant, comme un biceps humain.

Opérer sur un muscle mort, c'est se vouer d'avance à n'enregistrer que des résultats extrêmement incertains : les courants d'excitation n'ont ni la différence de potentiel, ni l'intensité, ni le rythme, ni la forme exacte des courants fournis par l'organisme au muscle ; le balayage des déchets qui s'accumulent dans la masse musculaire sous l'influence des excitations électriques ne se fait plus ; l'irrigation sanguine ne vient pas rafraîchir les substances échauffées par le fonctionnement, etc. Bref, avec un tel mode opératoire, on ne se trouve plus du tout dans les conditions de la vie et les chiffres trouvés ne sont susceptibles d'aucune précision : les variations de E , R , r' entraînent, comme nous l'a mon-

tré la théorie, de très grandes différences dans les résultats constatés.

Si l'on opère sur le muscle vivant, c'est un autre ordre de difficultés qui apparaît : le muscle travaillant différemment avec son antagoniste, l'entraînement du sujet au travail qu'on lui fait accomplir vient jouer un rôle très important, susceptible d'amener de grandes variations dans les résultats qu'on enregistre ; d'autre part, le sujet doit être assez actif pour exécuter du mieux qu'il peut le travail à effectuer et assez passif pour que sa volonté n'y introduise pas des perturbations importantes. Les courbes de Mosso ne sont-elles pas là pour montrer l'influence de la personnalité, dans tout ce qu'elle a de complexe, sur la forme des graphiques recueillis ?

La sagesse consiste donc, croyons-nous, à se contenter d'approximations que l'on tentera de rapprocher de la vérité en multipliant les observations, aussi bien dans des conditions aussi identiques que possible, pour un même travail, que dans des conditions dissimilaires — soigneusement déterminées — correspondant à des travaux variés. On opérera, en définitive, suivant le principe de la loi des grands nombres, en prenant, dans chaque groupe de cas, la racine carrée de la moyenne des carrés des nombres fournis par l'expérience. C'est la meilleure méthode à suivre dans l'état actuel de nos connaissances.

Nous allons voir, d'ailleurs, que même dans les cas simples et tout à fait théoriques où nous nous plaçons, le rendement de l'appareil musculaire est chose éminemment variable.

Travail de la secousse

Si nous nous plaçons dans le cas de la secousse ordinaire, nous savons que les travaux effectués par l'appareil

reil musculaire pendant la durée de cette secousse, sont :

1° Le travail de déplacement des forces électriques mises en présence par la charge ; ce travail, qui est à chaque instant égal et directement opposé au travail

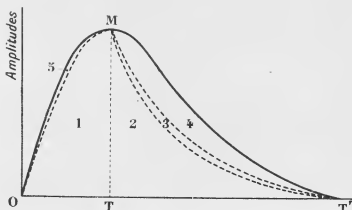


FIG. 34. — Décomposition des travaux de la secousse.

de compression du diélectrique, a pour expression, ainsi que nous l'avons vu antérieurement :

$$W_2 = \int_t^{t'} \frac{V_t^2}{\epsilon t + R} dt$$

Ce travail est mesuré par l'aire 1 du diagramme de la secousse (fig. 34) et se résout en chaleur par l'annihilation des forces électriques mises en présence ;

2° Le travail de compression élastique du diélectrique. Il est égal et de signe contraire à T, et sa valeur est :

$$-W_2 = E_1 \Omega \frac{\lambda^2}{l}$$

les symboles conservant ici la signification qui leur a été donnée dans l'exposé théorique. Ce travail est également mesuré par l'aire 1 du diagramme ;

3° Le travail de détente élastique du diélectrique. A un facteur près, qui représente la perte due au travail des forces élastiques, le travail de détente est égal à

W_2 . Il est représenté sur le diagramme par l'aire 2, égale à l'aire 1. La perte sera représentée par l'aire 3;

4° Le travail dû à la résistance ohmique, non égale à 0, du diélectrique. Ce travail est égal à :

$$W_1 = \int_0^t \frac{V_t^2}{\rho_t} dt$$

et se répartit sur les aires 4 et 5.

Si nous faisons la somme algébrique de tous ces travaux, en remarquant que les aires 1 et 2 sont égales,

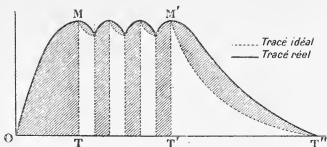


FIG. 35. — Diagramme du télanos incomplet.

nous voyons que le travail de la secousse est mesuré par l'aire MTT' du diagramme, si l'on néglige l'aire 5, ce qui n'entraîne qu'une erreur très inférieure aux erreurs d'expérience.

Le travail ainsi mesuré est le *travail indiqué*, et le myographe a rempli ici le même rôle que l'indicateur de WATT dans le relevé des pressions sur le cylindre d'une machine à vapeur.

Si la secousse a été libre, c'est-à-dire si aucun poids antagoniste n'a été opposé à la contraction du muscle, l'expérience ainsi faite permet de mesurer le travail intérieur propre au dispositif; c'est l'analogie de ce que l'on recherche quand on fait tourner un moteur à vide : l'énergie dépensée est l'expression du travail de ses résistances passives intérieures.

Travail du tétanos. Influence de la fréquence

La mesure du travail dépensé pendant le tétanos se déduit directement des considérations précédentes. Dans le cas de la secousse, nous avons transposé de 1 en 2 l'aire de travail de la charge électrique; renonçons pendant un instant à ce transfert. Si nous représentons (fig. 35) le diagramme d'un tétanos incomplet théorique, nous voyons immédiatement que les aires de travail sont celles marquées de hachures.

Un simple examen du graphique fait tout de suite comprendre l'influence de la fréquence : lorsque celle-ci

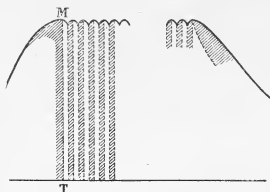


FIG. 36. — Influence de la fréquence.

augmente, l'aire de travail augmente également et tend, pour une fusion parfaite des secousses, à donner comme valeur du travail l'aire totale $MM'TT'$ (fig. 36).

Nous savons par ailleurs que l'amplitude dépend de la différence de potentiel appliquée à l'appareil, mais non de la fréquence des excitations, à partir du moment où celui-ci a reçu la charge d'électricité qui satisfait à sa capacité. Nous pouvons donc dire que *l'amplitude du tétanos est indépendante de la fréquence des excitations* et que *cette fréquence est seulement le facteur déterminant de la puissance du muscle strié en fonctionnement normal*.

Si nous faisons (fig. 37) sur le myogramme du téta-

nos une transposition identique à celle faite sur celui de la secousse, la surface de la partie ombrée, mesurée au planimètre ou par la méthode des trapèzes, permet d'établir le *travail indiqué utile* W_u et le travail des résistances passives W_p . Le premier correspond à l'aire $MM' TT'$; le second à l'aire $M' T' T''$.

Les indications ci-dessus permettent d'utiliser, pour

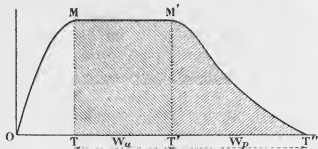


FIG. 37. — Travaux dans la contraction tétanique.

la mesure du travail, les graphiques à tracé plus compliqué correspondant aux expériences les plus diverses et nous pensons qu'il est inutile d'insister sur ce sujet.

Amplitude et section

L'amplitude de la contraction du muscle dépend non seulement des facteurs que la théorie a indiqués, mais aussi, évidemment, de l'épaisseur et du nombre des disques sombres placés en série; elle est donc fonction de l'épaisseur moyenne d'un disque épais de ce muscle et de la longueur totale de ce muscle. Cette amplitude est un facteur analogue à la course du piston dans un moteur thermique et, de cette comparaison, on peut tirer quelques données intéressantes. Nous en laissons le soin à nos lecteurs.

La section qui détermine la force portante d'un muscle est sa section droite équatoriale. Pour un tétanos par-

fait, la formule empirique donnant la force portante est de forme :

$$F = K \frac{SV^2}{a^2}$$

où F est la force portante, K un paramètre tenant compte du pouvoir inducteur spécifique de la substance des disques sombres, S la surface utile de la section droite, V la différence du potentiel appliquée au muscle (et non au nerf), a un paramètre prenant la place de la distance inconnue entre armatures. Cette formule résulte directement de la formule théorique, dont elle n'est qu'une simplification.

De même que, dans un moteur thermique, la puissance de ce moteur est une fonction, plus ou moins complexe selon le genre de machine considéré, de sa cylindrée, c'est-à-dire de la surface du piston multipliée par sa course, de même la puissance d'un muscle est fonction de son amplitude et de sa section.

Puissance. Rendement. Dépense

L'analyse des diagrammes relevés au myographe peut se faire par des méthodes analogues à celles qui sont employées par les constructeurs de moteurs industriels. Un tel examen sera fort utile, soit pour comparer un muscle à lui-même dans l'exécution de divers travaux, soit pour comparer deux muscles différents astreints à un travail identique.

L'interprétation du myogramme permet de mesurer le *travail indiqué* d'un muscle, ainsi que le travail de ses résistances intérieures. Les dispositifs sont nombreux qui permettent d'évaluer son travail extérieur ou *travail moteur* : frein dynamométrique, moulinet, dynamo-balance, etc.

On sait quelles sont les relations qui relient ces différentes quantités. On sait également comment elles per-

mettent de déterminer la *puissance* ou mieux, les différentes sortes de puissances qui caractérisent une machine et donnent une idée nette de son fonctionnement dans les divers cas de la pratique. On sait, enfin, comment se déterminent les différents *rendements*, à partir des données précédentes. Pour obtenir, d'une expérience à l'autre, des résultats comparables entre eux, il est absolument nécessaire de se conformer aux règles usitées en mécanique appliquée et de n'employer chacun des termes que dans la signification précise qui lui est donnée par sa définition : de nombreux malentendus pourraient naître d'une confusion entre la puissance utile et la puissance indiquée, entre le rendement mécanique ou organique, — relatif aux résistances passives du mécanisme moteur et qui, dans la plupart des moteurs est un taux très voisins de l'unité, — et le rendement électrique, — relatif aux pertes par effet Joule et par hystérésis, se chiffrant à un taux plus bas que le précédent. Le rendement brut sera le produit de ces deux quantités et le rendement net sera :

$$\eta = 1 - \frac{W_p}{W_m}$$

W_p étant le travail des résistances intérieures de la machine, W_m le travail extérieur ou travail moteur et $\frac{W_p}{W_m}$ le coefficient de perte.

Les courbes de puissance et de rendement (fig. 38) permettent de constater l'analogie de fonctionnement de l'appareil musculaire avec celle des moteurs industriels. La seule différence importante provient des manifestations de la fatigue, qui abaissent le rendement dans des proportions très grandes : ainsi, la comparaison des deux diagrammes (fig. 29) reproduits d'après les expériences de ИОТЕУКО permet de relever, sur le myogramme pris en état de fatigue, une augmentation

des résistances passives supérieure à 20 p. 100, ce qui, industriellement, serait un taux inadmissible. La courbe de fatigue, qui correspond à la courbe de « puissance perdue » tracée lors des essais des moteurs industriels, lui est analogue comme forme : toutes deux sont des hyperboles équilatères, mais la première est symétrique

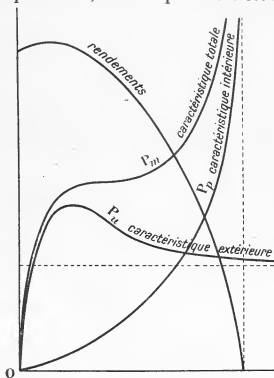


FIG. 38. — Caractéristiques du moteur musculaire.

de la seconde par rapport à l'axe des coordonnées ; elle croît quand l'autre décroît.

Comme pour le moteur à explosions, comme pour la dynamo, la *caractéristique* de puissance utile de l'appareil musculaire fait apparaître un maximum. Ce maximum est à grand rayon de courbure et délimite une région où les variations de puissance sont relativement moins importantes ; ce *plateau* sert à définir, industriellement, la vitesse de régime d'une machine ; biologiquement, il permet de déterminer l'*optimum* de fonctionnement d'un muscle donné.

Nous ne croyons pas nécessaire de parler de la *dépense* du muscle dans la production d'un travail mécanique : la loi de dépense est la même que celle de la fatigue et est, comme elle, une loi hyperbolique ; certains diagrammes expérimentaux de CHAUVÉAU, confirmant la théorie sur ce point encore, le montrent nettement, malgré que certains auteurs en aient voulu ramener le tracé à celui d'une droite, contre toute évidence. Nous croyons que cette erreur provient du fait suivant : les diagrammes ont été obtenus en se basant sur l'excès d'oxygène consommé par le sujet pendant la durée de l'expérience ; or, cet excès est mesuré dans l'air expiré par le poumon et non sur place, c'est-à-dire au muscle ; il en résulte un retard de la mesure sur le phénomène, retard qui apparaît très nettement à l'origine de la courbe tracée expérimentalement ; l'ordonnée moyenne entre celle de la courbe réelle et celle de la courbe expérimentale, dans cette région, détermine à peu près une droite située dans le prolongement des observations suivantes, et c'est ainsi que l'allure vraie de la courbe a pu ne pas apparaître aux expérimentateurs.

Formulons une autre observation qui nous est dictée par un examen des travaux de CHAUVÉAU sur les lois de la dépense : dans ses expériences, l'auteur considère comme un *travail négatif* le fait de descendre un escalier ou de retarder la descente d'un poids dont la corde sustentatrice est enroulée sur le tambour d'un treuil. Il est à peine besoin de dire que ce travail réfrénateur, s'il est énergétiquement moins onéreux que certains autres travaux, est, rigoureusement comme eux, un travail positif. Le travail ne pourrait être dit négatif que s'il y avait récupération d'énergie comme, par exemple, dans le freinage électrique des moteurs de traction. Ce cas n'est pas encore réalisable avec la machine animale... Mais l'erreur de point de vue que nous venons de signaler a conduit à de fâcheuses erreurs d'interpréta-

tion ; c'est pour cette raison que nous avons cru bon de la signaler.

En parlant des rendements de l'appareil musculaire, nous avons omis à dessein de parler du rendement global — rendement dit : industriel ou commercial — de la machine animale, ou de l'individu tout entier : l'obligation morale que contracte un employeur vis-à-vis du travailleur — homme ou bête — qu'il utilise, lui fait un devoir de laisser à ce dernier des temps de repos suffisants pour que l'employé puisse un peu « vivre sa vie » et ne soit pas asservi à un *sweating system* amenant la rapide déchéance qu'entraîne une fatigue continue. Cette condition ne permet guère de calculer avec une exactitude digne de foi le rendement d'un individu à partir des calories qu'il ingère avec ses aliments ; trop de facteurs entrent en ligne de compte pour que la fonction ne soit pas d'une complexité inextricable ! Admirons la sagesse avec laquelle TAYLOR a su placer la question sur un tout autre terrain.

MESURES ET CHIFFRES

L'exposé qui vient d'être fait tend vers cette conclusion que les mesures de capacités et de charges électriques, qui jusqu'à présent n'ont joué qu'un rôle extrêmement minime dans les recherches d'ordre physiologique, sont appelées à prendre une réelle importance. Malheureusement, de telles mesures comptent parmi les plus délicates à effectuer dès qu'on veut, avec quelque certitude, éliminer les principales causes d'erreurs susceptibles de fausser les résultats enregistrés, ou même de les faire apparaître dans un sens directement opposé à celui qu'ils ont réellement.

Sous peine d'importuner ceux qui ont bien voulu lire le présent ouvrage, nous ne pouvons pas tout dire de ce qui concerne les mesures à entreprendre pour pouvoir mettre des chiffres réels sur les formules théoriques qui ont été établies. Nous devons nous contenter de formuler « le point de vue de l'électricien ».

Insidieusement, dans tout l'appareillage mis en œuvre, depuis la connexion mal serrée jusqu'à l'électrode « impolarisable », les phénomènes d'induction électrostatique vont faire leur apparition avec des valeurs d'autant moins négligeables que les lames diélectriques ont une épaisseur plus minime et que, par voie de conséquence et toutes choses étant égales d'ailleurs, les actions inductives parasitaires sont d'autant plus importantes qu'elles se produisent à des distances plus faibles.

L'appareil dont on a tendance à se servir le plus généralement dès qu'il s'agit de mesurer des capacités

électrostatiques est le galvanomètre balistique, à travers lequel on fait passer, pour comparaison, les décharges respectivement dues à la capacité étudiée et à un condensateur-étalon. Avec une telle méthode, où l'emploi d'un shunt est souvent nécessaire pour ramener les lectures dans le champ de l'échelle divisée, il est bon de signaler que, dans le cas qui nous occupe, les erreurs s'accumulent. Tout d'abord, on obtient des élongations différentes pour différents temps de charge ; ensuite, la décharge n'étant pas instantanée, on ne mesure pas la quantité totale d'électricité mise en jeu, mais seulement une élongation du galvanomètre qui est proportionnelle aux premières intensités de décharge. Pour obtenir la quantité totale, il faudrait intégrer la courbe de décharge que l'on pourrait, par exemple, déterminer en se servant de la méthode appliquée par CURIE au quartz piézo-électrique. On n'obtiendra la capacité réelle qu'en employant des charges alternatives à très hautes fréquences.

Comme nous sommes ici dans un domaine où la détermination des valeurs absolument exactes apparaît peut-être comme un exercice un peu vain et sans aucune portée scientifique immédiate, alors que leur ordre de grandeur et leur direction sont des choses qui importent davantage, nous croyons qu'il est tout aussi sage de déterminer les grandeurs maxima des différences de potentiel en jeu, en utilisant l'électromètre absolu, et de se servir ensuite des diagrammes enregistrés pour déterminer, par des calculs suffisamment approchés, l'ordre de grandeur des autres valeurs recherchées. Si, industriellement, les mesures sont une nécessité impérieuse, parce que, sans elles, aucun mécanisme ne peut être connu, identifié et *reproductible*, la physiologie est loin d'en être à un stade aussi avancé de son histoire.

D'autre part, ainsi que nous l'avons vu, ce sont sur-

tout les phénomènes relatifs au couple hydroélectrique mis en jeu par l'organisme, qui influencent le jeu fonctionnel du dispositif musculaire. Nous imaginons que la réalisation d'un élément séparé, ayant même composition et dont on pourra, tout à loisir, étudier la polarisation et les caractéristiques de marche, ne présente aucune difficulté sérieuse d'établissement et est susceptible de faciliter les recherches.

Si l'on ne veut pas être conduit à énoncer des faits erronés, il faut avoir soin, dans les mesures concernant le dispositif musculaire proprement dit, de prendre une source à faible résistance ohmique intérieure, pour éviter de se trouver dans la partie très variable de la courbe des intensités (fig. 33). On voit donc avec quels soins méticuleux, d'ailleurs habituels dans toutes les recherches d'ordre physiologique, de telles expériences doivent être conduites. On voit également tout l'intérêt qui s'attache à la possession de graphiques exacts, relatant les variations de la résistance intérieure de la source électrique animale : *tout le problème du fonctionnement de l'appareil musculaire est, en fait, conditionné par cette résistance intérieure, qui augmente rapidement dès que le muscle est en action, c'est-à-dire consomme une quantité appréciable d'électricité.*

Signalons qu'en ce qui concerne le diélectrique, le pouvoir inducteur spécifique peut être obtenu à partir de mesures optiques : on sait, en effet, que des capacités inductives spécifiques des corps sont inversement proportionnelles aux carrés des vitesses de la lumière dans ces corps ; il suffit de mesurer les indices de réfraction des corps pour connaître leur pouvoir inducteur. Nous croyons savoir que F. VLÈS a fait ces mesures pour toutes les matières de la substance musculaire.

L'auteur regrette de devoir terminer ce volume sans donner les résultats de ses expériences personnelles : son seul outillage a consisté en une plume et du papier...

Mais ce qu'il n'a pu faire, d'autres le feront, mieux et plus vite.

Enfin, je tiens à exprimer ici mes sentiments d'affectueuse reconnaissance envers M. SUDRIA, ancien élève de l'École polytechnique et docteur ès sciences mathématiques, qui a bien voulu assumer la tâche ingrate de vérifier mon manuscrit avant qu'il fût remis à l'impression.

Paris, janvier 1928.

TABLE DES NOMS CITÉS

ADUCCO.	KRAUSE.
ÆBY.	KRONECKER.
AMICI.	LAMARCK.
AMPÈRE.	LA METTRIE.
ARSONVAL (D').	LAPICQUE.
BAINES (A.).	LAVOISIER.
BARON (R.).	LECLANCHÉ.
BEAU DE ROCHAS.	LEDUC.
BELL.	LEFEUVRE.
BERNARD (Cl.).	LIEBIG.
BOSE (Sir Jagadis Chunder).	LITTRÉ.
BOTTAZI.	LUDWIG.
CHAUVEAU.	MAREY.
CHEVREUL.	MAXWELL.
CONDILLAC.	MEYERHOF.
CROONE (W.).	MOSSO.
DESCARTES.	NEWTON.
DUBOYS-REYMOND.	NOUVION.
DUSSAUD.	PASCAL.
EDISON.	PLANTÉ.
FARADAY.	PRIESTLEY.
FÉRÉ (Ch.).	RAHBK.
GIRARD (P.).	RANVIER.
HELMOLTZ.	RENNESON.
HENRY (Ch.).	RICHET.
HENSEN.	SCHMIDT.
HESS A.).	SUDRIA.
HILL (A. V.).	TAYLOR.
HOSPITALIER.	TIPHAYGNE de la ROCHE.
IOTEYKO.	VIOLLE.
JOHNSEN.	VLÈS (F.).
JOULE.	VOLTA.
KELVIN (Lord).	WATT.
	WEISS.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	7
Hystérésis cérébrale	14
Expérimentation et hypothèse.	16
Oscillations du progrès.	20
Jonction nécessaire	23
Complication croissante du machinisme artificiel.	27
PHILOSOPHIE DES MÉCANISMES.	29
Statique. Cinématique. Dynamique.	31
Fonctionnement statique et fonctionnement cinématique	32
Dégradation d'énergie et trace.	34
Travail statique. Travail stérile.	35
Économie du fonctionnement pulsatoire.	36
MÉCANIQUE ET VIE.	41
Degrés de la vie.	41
Le rythme et la vie.	43
Équation vitale	47
Conclusion	48
Programme	52
SUR LES CONDENSATEURS ÉLECTRIQUES.	55
Diélectriques et champs électriques.	56
Théorie générale du condensateur à diélectrique perméable et élastique	57
Capacité apparente.	63
Influence de la température.	64
Absorption et charges résiduelles.	65
Théorie simplifiée.	68
Élasticité du diélectrique.	69
Force portante d'un condensateur.	72
Phénomènes calorifiques.	74

Secousse du condensateur	76
Contraction statique du diélectrique	77
Élévation automatique de tension	79
Hystérésis diélectrique	80
Champ magnétique	81
Dispositif à répulsion	83
Conclusion	87
LE MUSCLE, CONDENSATEUR ÉLECTRIQUE	89
La fibrille musculaire	90
Le sarcoplasme	93
Le muscle à fibres lisses	95
Le muscle, dispositif dualiste	96
Le muscle, solide d'égale résistance	98
Le muscle, machine réversible	98
Le muscle, générateur de champs magnétiques	101
Le muscle, détecteur d'ondes électromagnétiques	102
Appareil de démonstration	103
LA SOURCE D'ÉLECTRICITÉ	105
ÉLECTRODYNAMIQUE MUSCULAIRE	113
La secousse; diagramme du moteur vivant	114
Temps perdu	117
Constante de temps (chronaxie)	118
États antérieurs. Hystérésis	122
Addition latente. Décharges résiduelles	122
Contraction tonique	123
Contraction tétanique	124
Onde musculaire	126
Force portante	127
Contraction cinématique	128
Amplitude et fréquence	129
Variation de température	129
Température optima	135
LA FATIGUE	137
Fatigue de la source d'énergie	141
Ergogramme de Kronecker	145
Courbes d'endurance	145
Équation Ioteyko-Henry	146
Intensités de charge	146
Troubles fonctionnels. Contracture	148

TABLE DES MATIÈRES	173
Rythme fonctionnel	149
TRAVAIL. PUISSANCE. RENDEMENT	153
Travail de la secousse	154
Travail du tétanos. Influence de la fréquence. . .	157
Amplitude et section.	158
Puissance. Rendement. Dépense.	159
MESURES ET CHIFFRES.	165
TABLE.	169

